

YHASMIN PAIVA RODY

**BALANÇO DE CARBONO E TROCAS GASOSAS NOS DIFERENTES  
COMPARTIMENTOS EM PLANTIOS DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS- BRASIL  
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R697b  
2013

Rody, Yhasmin Paiva, 1982-

Balanço de carbono e trocas gasosas nos diferentes  
compartimentos em plantios de eucalipto / Yhasmin Paiva Rody.  
– Viçosa, MG, 2013.

x, 92f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Aristides Ribeiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Meteorologia agrícola. 2. Isótopos estáveis.  
3. Meteorologia - Métodos estatísticos. 4. Eucalipto. 5. Dióxido  
de carbono - Concentração. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola. II. Título.

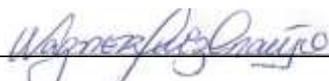
CDD 22. ed. 630.2515

YHASMIN PAIVA RODY

**BALANÇO DE CARBONO E TROCAS GASOSAS NOS DIFERENTES  
COMPARTIMENTOS EM PLANTIOS DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 09 de agosto de 2013.



Wagner Luiz Araújo



Marcelo Zacharias Moreira



Nairam Félix de Barros



Rodolfo Araujo Loos  
(Coorientador)



Aristides Ribeiro  
(Orientador)

*À minha querida mãe, Maria José de Paiva,  
Meu exemplo de vida.... sempre!*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, amado da minh'alma, fonte suprema de amor.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Ao Professor Aristides Ribeiro pelos conhecimentos repassados, amizade e confiança. Sou grata pelas inúmeras oportunidades e pela grande contribuição na minha formação profissional.

À empresa Fibria pelo apoio irrestrito. Em especial, ao Dr. Rodolfo Araújo Loos pelas valiosas ajudas e prontidão para que este trabalho fosse executado da melhor maneira possível e à equipe de trabalho de Aracruz (ES): Carlos Eduardo Scardua, Almir Rogério da Silva e Julio Cesar Siqueira do Rosario, na qual obtive grande aprendizado.

À equipe Fibria e de Três Lagoas (MS): Ailton Silva, Ronivon do Carmo, Antônio Divino Rodrigues e Claudiney e aos funcionários da empresa Argel pela viabilização deste trabalho.

Ao Professor Ivo Ribeiro pelos valiosos conselhos e ensinamentos para melhor aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao professor Carlos Alberto Martinez Y Huaman pelas orientações.

Ao meu marido Hugo, pelo amor, amizade e companheirismo.

As queridas Aline Vasconcelos Almeida e Mariana Gonçalves Reis pela amizade, companheirismo e ajuda nas coletas, essenciais para a conclusão deste trabalho.

À querida Luciana Souza pela ajuda no processamento dos dados do III capítulo e amizade.

À família pelo apoio.

Aos amigos do "SOPA": Aline Santana, Luciano Roncete, Valéria Klippel, Robert, Barbosa, Ana Paula Vilela, Aloísio Oliveira, Luiz Felipe Fontes, Carla Raphaela, Julyana Viana, José Eduardo Scardua, Vitor Barbosa, Jorge Mejia e Wellian Chaves.

## **BIOGRAFIA**

YHASMINE PAIVA RODRY, filha de Maria José de Paiva, natural de Belo Horizonte, Minas Gerais, nasceu no dia 10 de outubro de 1982. No período de 2004 a 2006 foi bolsista de iniciação científica pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Em agosto de 2007, graduou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Espírito Santo, ES. Obteve o título de mestre em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa, MG, em agosto de 2009, e em seguida, deu continuidade aos estudos e pesquisas no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, obtendo o título de doutora em agosto de 2013.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
INTRODUÇÃO GERAL .....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	3

### CAPÍTULO I

#### AVALIAÇÃO DAS TROCAS GASOSAS EM PLANTIOS DE EUCALIPTO NA REGIÃO CENTRO-OESTE DO BRASIL

RESUMO .....	4
1. Introdução .....	5
2. Material e Métodos .....	7
2.1. Área de estudos .....	7
2.2. Dados meteorológicos e de umidade do solo .....	8
2.3. Medidas de biomassa, índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE) .....	11
2.4. Trocas gasosas .....	11
2.5. Análise estatística .....	13
3. Resultados e Discussões .....	13
4. Conclusões .....	25
5. Referências Bibliográficas .....	26

### CAPÍTULO II

#### RESPIRAÇÃO E PARTIÇÃO DE FONTES CO<sub>2</sub> E DA RAZÃO ISOTÓPICA DO CARBONO EM PLANTIOS DE EUCALIPTO

RESUMO .....	30
1. Introdução .....	31
2. Material e Métodos .....	33
2.1. Áreas de estudos .....	33
2.2. Dados meteorológicos .....	34
2.3. Medidas de biomassa, índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE) .....	37
2.4. Medidas de fluxos e razão isotópica da respiração .....	38
2.5. Análises estatísticas .....	41

3.	Resultados e Discussões.....	42
4.	Conclusões .....	58
5.	Referências Bibliográficas .....	58

### **CAPÍTULO III**

#### **DETERMINAÇÃO DOS BALANÇOS DE CO<sub>2</sub>, ÁGUA E ENERGIA EM FLORESTAS DE EUCALIPTO**

RESUMO .....	63
1. Introdução .....	64
2. Materiais e Métodos .....	66
2.1. <i>Área de trabalho</i> .....	66
2.2. <i>Dados meteorológicos</i> .....	68
2.3. <i>Análise dos dados do sistema eddy covariance (EC)</i> .....	69
2.4. <i>Determinação das trocas gasosas líquidas (NEE) e brutas (GEP) do ecossistema</i>	70
2.5. <i>Preenchimento de falhas</i> .....	70
2.6. <i>Balço de energia</i> .....	71
2.7. <i>Cálculo da evapotranspiração e da eficiência do uso da água (EUA)</i> .....	71
2.8. <i>Estimativas do IAF</i> .....	72
3. Resultados e Discussões.....	72
4. Conclusões .....	85
5. Referências Bibliográficas .....	86
CONCLUSÕES GERAIS .....	92

## RESUMO

RODY, Yhasmin Paiva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2013. **Balanco de carbono e trocas gasosas nos diferentes compartimentos em plantios de eucalipto.** Orientador: Aristides Ribeiro. Coorientadores: Ivo Ribeiro da Silva, Rodolfo Araujo Loos e Carlos Alberto Martinez Y Huaman.

O balanço de carbono em ecossistemas florestais é representado pela produção primária líquida, definida como a diferença entre a energia química fixada pela fotossíntese e a perda entre respiração heterotrófica e autotrófica e a mortalidade. O entendimento destes processos é crítico para prever os efeitos do ambiente no crescimento da planta. O presente estudo teve por objetivo investigar as trocas de CO<sub>2</sub> e vapor d'água em escalas de órgãos da planta, de dosséis e por medidas no solo, buscando avaliar as variações temporais de forma contínua e em medidas pontuais e os efeitos da sazonalidade climática em plantios de eucaliptos em diferentes idades. Para isto, foram utilizados equipamentos que coletam dados em alta frequência, a partir de técnicas de razão isotópica e do sistema *eddy covariance* presente em duas torres micrometeorológicas em plantios de eucalipto localizados no Estado do Mato Grosso do Sul. As medidas abrangeram as idades de 0 – 18 meses (eucalipto jovem) e 49 a 65 meses (eucalipto adulto). A absorção do CO<sub>2</sub> da atmosfera foi crescente a partir do plantio das mudas no campo. Em idades mais jovens, são verificadas as maiores taxas de fixação, determinada pela produtividade primária bruta e respiração de CO<sub>2</sub>, provavelmente devido ao crescimento mais acelerado, observado por maiores incrementos de biomassa. Maiores fluxos respiratórios de CO<sub>2</sub> foram mensurados em folhas e raízes das plantas nestas idades. No plantio adulto, os fluxos de CO<sub>2</sub> apresentam um sensível aumento ao longo do tempo, reduzido na estação seca, sendo as folhas, o órgão com maior atividade respiratória, assim como nos plantios jovens. A resposta da planta ao clima é evidenciada pelo incremento do fluxo de CO<sub>2</sub> com as maiores médias observadas nos valores diários da fotossíntese líquida, condutância estomática e da transpiração nas épocas de maiores disponibilidades hídricas e de energia. Também observou-se a influência da sazonalidade climática nas medidas biométricas do índice de área foliar e da área foliar específica. Em épocas secas, verifica-se que o plantio jovem foi mais eficiente no uso da água em relação ao adulto, o que facilita a aclimatação da planta em continuar a incorporação de carbono. As medidas de respiração do solo

mostraram-se correlacionadas positivamente à temperatura do solo, sendo também influenciadas pelo conteúdo de água presente no solo. Comparando o resultado gerado pela influência do clima na razão isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) dos fluxos respiratórios, observa-se que em geral, os órgãos da planta e o solo apresentaram maiores discriminações na estação chuvosa. Não houve diferença estatística entre o  $\delta^{13}\text{C}$  de nenhum dos órgãos avaliados nos plantios jovem e adulto na estação chuvosa, diferente das folhas e os galhos na estação seca. A contribuição particionada dos indivíduos autotróficos e heterotróficos gerada a partir dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  em uma análise de mistura sugeriu que 51,7% é relacionado à parte aérea do ecossistema e logo, 48,3% é provida da respiração do solo e seus componentes. As metodologias utilizadas contribuíram com maior entendimento do balanço de carbono e a relação solo-planta-atmosfera e mostraram-se eficiente para avaliar as fontes contribuidoras do fluxo respiratório de ecossistemas de eucalipto.

## ABSTRACT

RODY, Yhasmin Paiva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2013. **Carbon balance and gas exchanges in the different compartments of Eucalyptus plantations.** Adviser: Aristides Ribeiro. Co-advisers: Ivo Ribeiro da Silva, Rodolfo Araujo Loos and Carlos Alberto Martinez Y Huaman.

The carbon balance in forest ecosystems is represented by the net primary production, which is defined as the difference between the chemical energy fixed by photosynthesis and the loss between heterotrophic and autotrophic respiration and mortality. Understanding these components and the factors that regulate the species is critical to predicting the effects of the environment on plant growth. The objective of the present study was to investigate the CO<sub>2</sub> and water vapor exchanges in plant organs from integrated canopies and by measurements on the soil, continuously and specifically evaluating the temporal variations and the effects of climate seasonality on eucalyptus plantations at different ages. For this purpose, we utilized tools for high-frequency data collection by the isotope ratio and eddy-covariance system techniques present in two micrometeorological towers in eucalyptus plantations located in the Central-West region of Brazil, more specifically in the state of Mato Grosso do Sul. Soon after planting, a growing increase in the absorption of CO<sub>2</sub> from the atmosphere was observed, indicating that the plant increased its carbon fixation. At younger ages they presented higher fixation rates, determined by the gross primary productivity and respiration of CO<sub>2</sub> most likely accumulated due to the more accelerated growth, verified by the greater biomass increments. Higher CO<sub>2</sub> flows were found in the leaves and roots at these ages. In the adult age, CO<sub>2</sub> flows presented a marked increase over time, reduced in the dry season; as in the young plantations, the leaves accounted for respiratory activity. Response of the plant to the climate was demonstrated by its increased CO<sub>2</sub> flow, and the highest daily values for net photosynthesis rate, stomatal conductance and transpiration were observed in the periods of greater water and energy availabilities. Climatic seasonality was also found to affect the biometric measurements of the leaf area index and specific leaf area. In dry periods, the young plantation more efficiently utilized water than the adult plantation, which facilitates acclimatization of the plant to allow for carbon incorporation to continue, avoiding excessive water loss. Measures of soil respiration showed to be correlated with the soil temperature, and they were also affected by the soil water content. When comparing the result generated by the influence of climate

on the isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of the air flows, we observed that the plant organs and the soil generally showed greater discriminations in the rainy season. There were no statistical differences between the  $\delta^{13}\text{C}$  of any of the organs evaluated in the young and adult plantations during the rainy season. This result differs for the leaves and branches in the dry season. The partitioned contribution of the autotrophic and heterotrophic individuals generated from the  $\delta^{13}\text{C}$  values in a mixed analysis suggested that 51.7% is related to the aerial part of the ecosystem, and thus 48.3% is from respiration of the soil and its components. The adopted methodologies contributed to better understanding of the carbon balance and the soil-plant-atmosphere relation, and showed to efficiently evaluate the sources that contribute to the air flow in eucalyptus ecosystems.

## INTRODUÇÃO GERAL

Diante do cenário do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, os governos têm debatido formas de minimizar essas emissões, sem prejudicar, no entanto, o crescimento econômico. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) foi criado na Conferência de Quioto, em 1997, como um instrumento pelo qual os países desenvolvidos podem investir em projetos em países em desenvolvimento, que visem a promoção de sequestro de carbono. A Conferência Rio+20 destacou a importância de esforços para a gestão sustentável de florestas e iniciativas que resultem em redução de CO<sub>2</sub> provindos do aumento dos estoques de carbono florestal dos países em desenvolvimento (Rio+20, Conference, 2012). Neste sentido, o Brasil apresenta grande potencial de contribuição ao esforço coletivo mundial para redução do aquecimento global, devido à presença de grandes maciços florestais nativos e à crescente implantação de novas áreas de plantios florestais.

Os plantios florestais têm aumentado consideravelmente no Brasil nos últimos 20 anos, ocupando em 2011, uma área de 6,5 milhões de hectares, sendo que 4,8 milhões de hectares são plantios de eucalipto. O estado do Mato Grosso do sul, ocupa atualmente a quarta posição no cenário nacional com 475.528 ha plantados, embora se apresente com o índice crescente em plantios de florestas de eucalipto no Brasil (25,7%) no ano de 2011 (Abraf, 2012). Estes dados demonstram a importância de se realizar pesquisas para melhor entendimento das relações planta-solo-atmosfera nestas áreas e no aperfeiçoamento de técnicas de manejo buscando promover o aumento sustentável da produtividade.

O conhecimento do potencial de fixar carbono pelos diferentes ecossistemas constitui uma ferramenta para a tomada de decisão quanto à mitigação das mudanças climáticas. A produção primária líquida (PPL) de florestas representa a quantidade de energia solar convertida em compostos orgânicos pela fotossíntese e subtraída de processos respiratórios dos indivíduos autotróficos e heterotróficos, permitindo avaliar possíveis alterações decorrentes da mudança no uso do solo e inferir sobre a sustentabilidade dos sítios florestais. Assim, é possível elucidar se estes sistemas florestais comportam-se como fonte ou sumidouro de CO<sub>2</sub>.

De forma integrada, estudos hídricos devem ser realizados visto que a água é um fator essencial no crescimento das plantas, responsável por oscilações na

produtividade e produção de regiões agrícolas. A eficiência de seu uso pela vegetação é definida como a quantidade de carbono assimilada por unidade de massa de água transpirada e representa o acoplamento dos ciclos do carbono e água e suas interações (Law et al. 2002; Tian et al. 2010). Esta relação expressa quantitativamente o comportamento das trocas gasosas na folha por relacionar a assimilação de CO<sub>2</sub> com a condutância estomática e a transpiração possibilitando desta forma, determinar os impactos das condições ambientais e fisiológicas no desempenho de determinada cobertura vegetal (Rosemberg et al. 1983).

O entendimento nos processos de troca de energia entre a superfície da terra e como eles retornam à atmosfera é fundamental para verificar a suscetibilidade e variabilidade do ecossistema ao clima (Eugster et al. 2000). As florestas exercem um importante papel na conversão da energia solar em biomassa pelo processo fotossintético e por sua alta capacidade térmica (Santos et. al., 2002).

Neste contexto, técnicas como os isótopos estáveis do carbono (<sup>12</sup>C e <sup>13</sup>C) e o sistema *eddy covariance* podem ser usados para traçar padrões e verificar mecanismos fisiológicos, associados com a fotossíntese e respiração no ecossistema (Yakir e Wang 1996; Ogée et al. 2003; Bowling, 2008; Baldocchi, 2008) em escala de planta e ecossistema, quantificando diretamente a troca de massa e energia entre a superfície e a atmosfera. O desenvolvimento destas técnicas têm proporcionado aos cientistas novos entendimentos sobre o carbono, os ciclos da água em escalas que vão de compostos metabólicos da folha (Badeck et al. 2005) a global (Griffis, 2013).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abraf – Associação Brasileira Florestal. *Anuário Estatístico da ABRAF 2012 -Ano Base 2011*. <http://www.abraflor.org.br/>. Acessado em 15 de maio de 2013.

Badeck F.W., Tcherkez G., Nogués S., Piel C., Ghashghaie J. Post-photosynthetic fractionation of stable carbon isotopes between plant organs—a widespread phenomenon. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, v. 19, p. 1381–1391, 2005.

Baldocchi D. Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, v. 56, p. 1–26, 2008.

Bowling D. R., Pataki D.E., et al. Carbon isotopes in terrestrial ecosystem pools and CO<sub>2</sub> fluxes. *New Phytol.*, v. 178, n. 1, p. 24-40, 2008.

Eugster, W., Rouse, W., Pielke Sr., R.A., McFadden, J.P., Baldocchi, D., Kittel, D., Chapin III, T.G.F., Liston, F.S., Vidale, G.E., Vaganov, P.L., Chambers, E.S. Land-atmosphere energy exchange in Arctic tundra and boreal forest: available data and feedbacks to climate. *Global Change Biol.* v. 6, n. 1, p. 84–115, 2000.

Griffis, T. J. Tracing the flow of carbon dioxide and water vapor between the biosphere and atmosphere: A review of optical isotope techniques and their application. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 174, p.85–109, 2013.

Lal, R. Forest soils and carbon sequestration. *For.Ecol. Manag.*, v. 220, p. 242-258, 2005.

Ogee J, Peylin P, Ciais P, Bariac T, Brunet Y, Berbigier P, Roche C, Richard P, Bardoux G, Bonnefond J-M. Partitioning net ecosystem carbon exchange into net assimilation and respiration using <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> measurements: a cost-effective sampling strategy. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 17, p.1070, 2003.

Rio+20. *Conference Report of the United Nations Conference on Sustainable Development*. United Nations. Rio de Janeiro, Brazil. 126p, 2012.

Rosenberg, N. J.; Blad B. L. *Microclimate The biological environment*. John Wilay & Sons. New York. 495p. 1983.

Tian, H. et al. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007. *Forest Ecology and Management*, v. 259, p. 1311-1327, 2010.

## CAPÍTULO I

### AVALIAÇÃO DAS TROCAS GASOSAS EM PLANTIOS DE EUCALIPTO NA REGIÃO CENTRO-OESTE DO BRASIL

#### RESUMO

A relação entre o consumo hídrico e a produtividade florestal ocorre devido aos efeitos diretos e indiretos da disponibilidade de água no crescimento das árvores que afetam a troca líquida de carbono no ecossistema. O entendimento dos fatores que regulam estas trocas é crítico para prever os efeitos do ambiente no balanço de carbono. Assim, este trabalho teve por objetivo caracterizar o comportamento ecofisiológico em plantios jovens (0-17 meses) e adultos (49-65 meses) de eucalipto no Estado do Mato Grosso do Sul. Foram observadas maiores valores diários da fotossíntese líquida, condutância estomática e da transpiração, nos períodos de maior disponibilidade hídrica nas idades medidas. Os valores reduzidos destas variáveis em épocas mais secas refletem a menor interceptação da radiação fotossinteticamente ativa pelo dossel e a redução do carbono incorporado na superfície foliar. O plantio jovem foi mais eficiente no uso da água em relação ao adulto na época seca. Nas épocas de suprimento hídrico adequado, a taxa de carboxilação máxima pela Rubisco, é significativamente maior no plantio jovem comparada aos adultos, além da maior capacidade de regeneração desta enzima em concentrações atmosféricas inferiores de CO<sub>2</sub>. A respiração noturna apresentou baixa relação com a temperatura foliar, sendo o resultado melhor correlacionado com a umidade relativa do ar e o déficit de pressão de vapor. As medidas da respiração do solo tiveram influência da temperatura e da umidade do solo. Os resultados demonstram a influência de variáveis climáticas nas respostas fisiológicas e biométricas da planta e que os plantios mais jovens tendem a realizar maiores trocas gasosas à maior taxa de crescimento traduzidos pelas maiores variações dos incrementos de biomassa.

**Palavras Chave:** Eficiência do uso da água, Fotossíntese, Respiração.

## 1. Introdução

Os plantios florestais têm aumentado no Brasil nos últimos 20 anos, ocupando em 2011, uma área de 6,5 milhões de hectares, sendo que 4,8 milhões de hectares são plantios de eucalipto. O crescimento do setor florestal levou o Estado do Mato Grosso do Sul, a ocupar a quarta posição no país com 475.528 ha plantados, embora se apresente como segundo maior índice de crescimento (25,7%) no ano de 2011 (Abraf, 2012).

O gênero *Eucalyptus* envolve cerca de 700 espécies, considerado um alto número quando comparado a outros gêneros florestais. Esta diversidade é atribuída em grande parte à substancial exogamia (Bolander et al. 2006) e à forte influência das condições edáficas e climáticas (Adams, 1996), o que resulta em uma forte associação entre as espécies do gênero com o ambiente em que estão inseridos. Apesar da grande variedade, as mais plantadas ao redor do mundo são dominadas pelas ‘big nine’ (Harwood, 2011), ou seja: *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. nitens*, *E. saligna*, *E. dunnii* e *E. pellita*. Estas, aliadas aos seus híbridos, somam 90% dos plantios de eucalipto.

Sabe-se que muitas espécies de eucalipto utilizadas em plantios comerciais apresentam elevado consumo hídrico quando este recurso é disponível (Almeida e Soares, 2003, Carneiro et al. 2008). Entretanto, à medida que a disponibilidade de água no sistema diminui, há um eficiente controle da transpiração, em decorrência do fechamento parcial ou total dos estômatos (Chaves et al. 2004; Tatagiba et al. 2008). A compreensão das respostas fisiológicas dos clones selecionados para tolerância a períodos longos de seca é essencial para auxiliar programas de melhoramento genético buscando aumento de produtividade.

A relação entre a disponibilidade hídrica e a produtividade ocorre devido aos efeitos diretos e indiretos da deficiência de água no crescimento das árvores. Dentre os efeitos destacam-se o aumento da resistência estomática (Vose e Swank, 1994), a diminuição do aporte nutricional das árvores via fluxo de massa e difusão, a redução da velocidade de mineralização da matéria orgânica e, em grau mais elevado, o próprio colapso funcional ao nível citoplasmático e tissular (Sands e Mulligan, 1990).

Os fluxos de vapor d'água e gás carbônico (CO<sub>2</sub>) entre as plantas e a atmosfera são fortemente acoplados, pois ambos os gases são difundidos através da

abertura dos estômatos. Estas organelas desempenham um papel crítico na fisiologia da folha, equilibrando a necessidade fotossintética com a absorção do CO<sub>2</sub> e a perda de água (Katul et al. 2003). Neste processo, têm-se sugerido que a condutância estomática e a do mesofilo foliar podem limitar o influxo de CO<sub>2</sub> em direção aos cloroplastos e, conseqüentemente, promover as taxas de fotossíntese em uma mesma magnitude (Warren et al. 2003; Flexas et al. 2008).

A produção primária líquida do ecossistema (PPL) pode ser determinada, contabilizando-se os ganhos de energia pela fotossíntese e as perdas pela respiração e mortalidade, obtendo-se o saldo de carbono (balanço) de um ecossistema. Esta troca líquida de carbono pode desempenhar um papel fundamental na regulação do CO<sub>2</sub> atmosféricos e nas mudanças globais (IPCC, 2006). Desta forma, o entendimento dos processos da fotossíntese e da respiração é crítico para predizer os efeitos do ambiente no balanço de carbono.

No processo metabólico da respiração, a energia para uso celular é armazenada nos compostos de carbono e liberada de maneira controlada, integrando uma fonte autotrófica, provinda da planta via compostos biossintetizados realizados pelas folhas, caules, galhos e raiz e outra heterotrófica por microrganismos decompositores presentes no solo. Dentre os componentes autotróficos que contribuem para a respiração do ecossistema, a folha é o órgão com a maior contribuição ao fluxo respiratório (Amthor e Baldochi, 2001). Ainda são poucos os trabalhos de medição da respiração para a determinação da PPL (Lavigne e Ryan 1997, Kominami et al. 2008), especialmente para espécies de eucalipto (Keith et al. 2012).

Os estudos sobre as interações planta-ambiente devem ser realizados visto que a planta é impactada nos seus processos pela exposição e sensibilidade da sua resposta ao meio (Booth, 2013). Neste sentido, este tema tem sido explorado no Brasil avaliando as respostas dos plantios de eucalipto às condições climáticas de distintos sítios florestais. Baesso (2012) e Mielke et al. (1999) analisaram trocas gasosas em plantios clonais no Estado do Espírito Santo. Carneiro et al. (2008) verificaram o mesmo em plantios em Minas Gerais. Hubbard et al. (2010) estudaram plantios no Espírito Santo e Bahia.

É de grande importância realizar pesquisas referentes aos temas até aqui expostos para que sirvam de base para o desenvolvimento do setor florestal brasileiro. Em particular, o Estado do Mato Grosso do Sul apresenta clima irregular

quanto à observação da distribuição das chuvas em normais climatológicas, com períodos muito chuvosos revezando-se com outros de severa estiagem (Zavattini, 2009), tornando este estudo importante fonte de avaliação.

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo caracterizar o comportamento ecofisiológico em plantios de eucalipto no Estado do Mato Grosso do Sul. Designou-se as seguintes hipóteses: as plantas mais jovens apresentam elevada taxa de crescimento e aumento das trocas de CO<sub>2</sub> e água com o ambiente comparadas às adultas; a maior abundância de recursos climáticos tende a acelerar o intercâmbio de trocas gasosas planta-ambiente em ambas idades.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Área de estudos

Trabalhou-se em áreas de plantios comerciais da empresa Fibria no município de Brasilândia, Estado do Mato Grosso do Sul. O município encontra-se localizado na unidade geomorfológica do Planalto Sedimentar do Paraná. O clima da região é o tropical, quente e semi úmido, do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, sendo marcado por chuvas no verão e períodos secos durante o inverno, com totais anuais médios de 1.300 mm de precipitação e temperaturas médias históricas variando de 21,2 a 27,0 °C, de acordo com as normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A vegetação nativa da região pertence ao bioma Cerrado, de tipologia Cerradão, em estágio médio de regeneração. Em alguns trechos ocorrem sinais de perturbação com dossel descontínuo e alta densidade de espécies de *Poaceae* (taquaras), características de locais mais perturbados (Fibria, 2011).

As áreas de estudo estão representadas na Figura 1. Trabalhou-se em dois talhões de plantios clonais de *E. grandis* com idades variando entre 0 – 18 meses (jovem) e 49 – 65 meses (adulto). Ambos os plantios estão no espaçamento de 3,6 x 2,5 m e áreas de 63,3 ha (talhão jovem) e 81,1 ha (talhão adulto).

O talhão jovem corresponde ao solo Latossolo Vermelho distrófico Espessarênico (Lvd2), com textura média leve. O talhão adulto corresponde ao Latossolo Vermelho distrófico típico (Lvd5), com textura média pesada.

Foram alocadas sistematicamente cinco parcelas permanentes de 30 x 30 m por talhão. Os plantios jovem e adulto correspondem a áreas de segundo ciclo e de implantação, respectivamente, ocupadas anteriormente por pastagem.

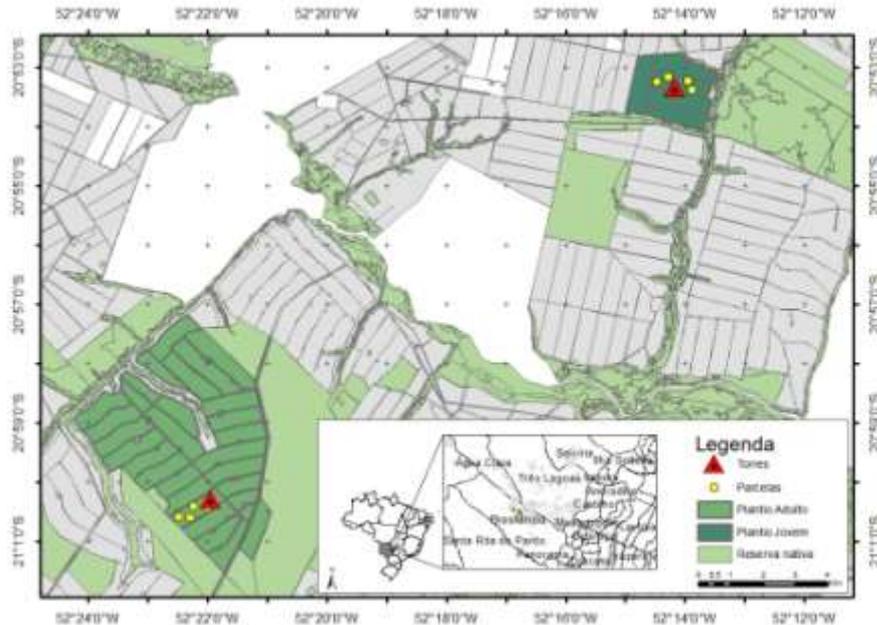


Figura 1. Localização das áreas de estudo: parcelas fixas e torres micrometeorológicas em plantios jovem e adulto de eucalipto.

## 2.2. *Dados meteorológicos e de umidade do solo*

Foram instaladas estações meteorológicas automáticas (EMA's) em duas torres nos talhões dos plantios jovem e adulto. Cada torre conta com os seguintes sensores: piranômetro, modelo LI-200SA (Li-cor, Nebraska, USA) para medidas da radiação solar global; saldo radiômetro, modelo NR-Lite2 (Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah) para o saldo de radiação; sensor quântico, modelo LI-190SB (Li-cor, Nebraska, USA) para a radiação fotossinteticamente ativa; pluviômetro, modelo CS700-L (Hydrological Services, Liverpool, Australia) para a precipitação; anemômetro sônico (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) para velocidade e direção do vento; fluxo de calor no solo, modelo HFP01 (Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah); termistor e capacitor modelo HMP45 (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) para a temperatura e umidade relativa do ar. Trabalhou-se com

freqüência de leitura de dados de cinco segundos e registro de médias ou integrações em intervalos de 30 minutos.

Para mensurar a variabilidade temporal e espacial da umidade do solo, foram utilizados os sensores Envirosmart (Sentek, SA, Austrália) e Diviner (Sentek, SA, Austrália) respectivamente. Os tubos de acesso de ambos os equipamentos foram instalados abrangendo o perfil do solo até 1,8 m de profundidade, em posições de linha e entrelinha do plantio, totalizando 24 tubos nos dois plantios. Foram feitas leituras em intervalos de 60 segundos e médias registradas a cada meia hora para os dados temporais e média dos dados nas duas posições nas parcelas.

Para a umidade do solo, foram realizadas curvas de calibração dos equipamentos. No final da estação seca, em que foram verificados menores conteúdos de água no solo (agosto/2012) instalaram-se seis tubos de acesso em cada um dos plantios buscando representar condições de solo seco, intermediariamente úmido e saturado e duas repetições de cada. O conteúdo de umidade nas camadas foi obtido pelo método gravimétrico concomitantemente com a medida pelo sensor em três repetições a cada 10 cm de profundidade até atingir 1 m. Os cálculos das freqüências relativas e da umidade volumétrica foram obtidos seguindo as equações propostas no manual do fabricante (Sentek, 1999) para obtenção dos coeficientes de calibração.

Para avaliar o suprimento hídrico local, realizou-se o balanço hídrico climatológico, sendo o consumo de água calculado pela equação de Penman-Monteith (1965), que inclui os componentes aerodinâmicos e o balanço de energia, em intervalos horários.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

em que:  $ET_0$ : evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $\Delta$ : declividade da curva de pressão de vapor na saturação ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $\gamma = 0,063 \text{ KPa}^\circ\text{C}^{-1}$  é a constante psicrométrica;  $R_n$ : radiação líquida ou saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $G$ : fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $U_2$ : velocidade do vento;  $T_{med}$  = temperatura média ( $^\circ\text{C}$ );  $e_s$  = pressão de vapor na saturação (kPa) e  $e_a$  = pressão de vapor atual (kPa).

Os balanços hídricos sequenciais foram estimados pelo método de Thornthwaite e Matter, (1955) adaptado ao ET<sub>0</sub>, com a capacidade de água disponível (CAD) no solo. A CAD foi determinada pelos valores do conteúdo de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, obtidos por meio das curvas de retenção de água no solo, de acordo com a profundidade do sistema radicular. Desta forma, as CAD's foram de 103 mm e 130 mm para plantios jovens e adultos, respectivamente.

Verifica-se um período prolongado de déficit hídrico de julho a dezembro. Durante a estação chuvosa é observado o pico de excedente hídrico no mês de janeiro (Figura 2-a,b). Os períodos mais frios são observados entre os meses de maio e agosto. Este comportamento é semelhante para ambos os plantios devido à proximidade das áreas e, portanto, menor variabilidade climática e do solo.

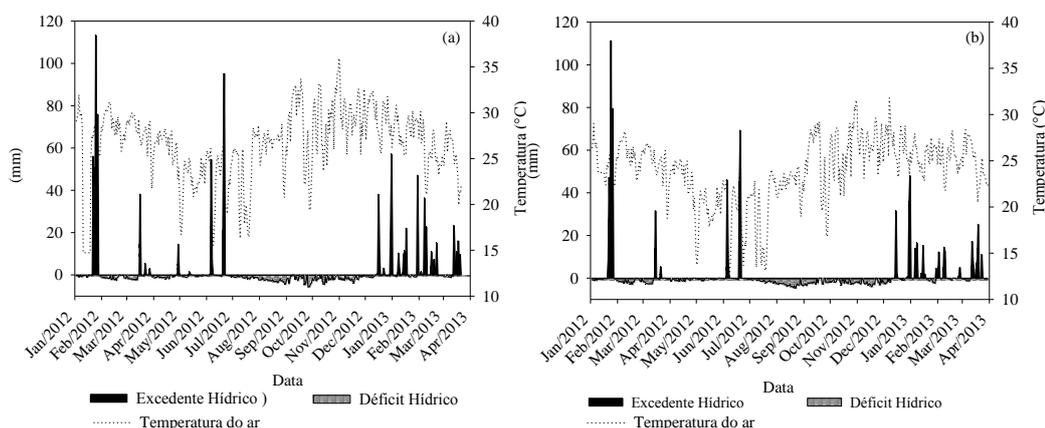


Figura 2. Extrato do balanço hídrico diário e temperatura média do ar diária no período de 01/2012 a 04/2013 em áreas dos plantios adulto (a) e jovem (b).

O déficit de pressão de vapor (DPV) foi calculado a partir da equação desenvolvida por Buck (1981), pela diferença entre a pressão de vapor saturada e a pressão real do vapor d'água.

### 2.3. *Medidas de biomassa, índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE)*

Para as análises destrutivas, foram eleitas as árvores que apresentaram características médias de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura. Foram abatidas três árvore/parcela e uma árvore/parcela por talhão para as medidas de raiz.

Foram obtidos separadamente os pesos frescos totais e das amostras para o tronco, galhos, casca, folhas, tronco e galhos. Em seguida, retirou-se os discos do tronco e dos galhos em alturas relativas ao comprimento total e um disco na altura do DAP. Todas as amostras do material separado foram colocadas em estufa (65°C) até estabilizarem-se em peso, para a obtenção do peso seco.

Para determinar a biomassa de raiz, foram abertas trincheiras escavando ao redor de cada árvore (cerca de 3 m × 2 m e 1,8 m de profundidade). Posteriormente, as raízes foram separadas por peneiramento e catação manual em classes de diâmetro ( $\phi$ ) em raízes finas ( $\phi < 2$  mm), médias ( $2 < \phi < 5$  mm) e grossas ( $\phi > 5$  mm). Foram obtidos separadamente os pesos frescos totais e das amostras de raízes que foram posteriormente levadas à estufa (65°C) para a obtenção do peso do material seco. A coleta foi feita nos meses de fevereiro/2012, junho/2012 e março/2013.

O IAF das árvores foi determinado conforme metodologia adotada por Dovey e du Toit (2006). Foram obtidos o peso fresco total das folhas e das amostras coletadas em diferentes estratos do dossel. Na sequência, as amostras foram levadas ao laboratório, para a determinação da área foliar utilizando o equipamento LI-3000 (Licor, Nebraska, USA) e do peso seco das folhas em uma estufa de circulação forçada a 65°C. A razão da massa úmida e seca e AFE foram calculadas e usadas para determinar o IAF de cada árvore amostrada. As coletas foram realizadas em fevereiro/2012, junho/2012 e março/2013.

### 2.4. *Trocas gasosas*

As medidas das trocas gasosas foram realizadas em um analisador de gases infravermelho portátil, modelo Li6400XT (Licor, Nebraska, USA), com fonte de luz acoplada, fixada em 1500 mmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> e concentração atmosférica ambiente, estabilizada por meio de um sistema *buffer*. As coletas dos dados foram realizadas em março/2012, agosto/2012, novembro/2012 e março/2013 em ambos plantios. Os

horários de medição compreenderam o período de 7:00 às 16:00 h para curvas diurnas e 22:00 às 03:00 h para as curvas noturnas de respiração foliar. Foram feitas réplicas de três dias de medidas nas curvas diárias.

Foi realizado um teste piloto para verificar a necessidade de se realizar as medidas de trocas gasosas em diferentes estratos do dossel das árvores. Verificou-se pelo teste estatístico de Tukey não existir diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre os estratos médio e superior. Por isso, trabalhou-se no estrato médio do dossel em quatro árvores e quatro folhas/árvore nas diferentes exposições à radiação solar. Para a mensuração, foram eleitas folhas totalmente expandidas do quarto ao sexto par de folhas no ramo, com aspecto sadio.

As variáveis de trocas gasosas medidas foram a assimilação de  $\text{CO}_2$  ou fotossíntese líquida ( $A$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), a condutância estomática ( $g_s$ ,  $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), a transpiração ( $E$ ,  $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e o efluxo respiratório noturno ( $R$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), importantes para melhor contabilizar as perdas do carbono assimilado via fotossíntese.

Obtidos os valores das trocas gasosas, foram calculadas as seguintes relações:  $\text{EUA} = A/E$ ,  $\text{EUA}_i = A/g_s$  (Zhang et al. 2001), em que EUA significa a eficiência do uso de água e  $\text{EUA}_i$ , eficiência intrínseca do uso de água, sendo essa última denominada de eficiência intrínseca do uso da água por considerar o mecanismo estomático (Machado et al. 2005). Os valores do curso diário foram obtidos utilizando-se dados médios, horário e diário.

A elaboração das curvas  $A/CI$  - fotossíntese ( $A$ ) versus concentração interna ( $CI$ ), foi conduzida de acordo com protocolo sugerido por Long e Bernacchi (2003). Inicialmente, a fotossíntese foi medida em concentração de  $\text{CO}_2$  ambiente e radiação fotossinteticamente ativa saturante até que foi verificado a estabilidade das medidas ( $\pm 0,7\%$ ) e logo, o estado de ativação da Rubisco (RuBP). Posteriormente, os valores da concentração ambiente ( $CA$ ) foram reduzidos para concentrações de 250, 200, 150, 100 e 50  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ . Após atingir a menor concentração, a próxima medida foi novamente em concentração ambiente (370  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) para obter o valor de fotossíntese original. Posteriormente, a  $CA$  foi aumentada para valores de 450, 550, 650, 800 e 1000  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ . Estas medidas foram obtidas em uma campanha única, realizada na estação chuvosa (03/2012).

A taxa máxima de carboxilação ( $V_{c,max}$ ) da enzima carboxilase/oxigenase da RuBP, a taxa de transporte de elétrons dirigindo a regeneração da RuBP ( $J_{max}$ ) foram

calculadas segundo Long e Bernacchi (2003) e Sharkey et al. (2007). Para os cálculos foram utilizados os parâmetros de trocas gasosas e temperatura foliar.

### 2.5. *Análise estatística*

Para avaliar a disponibilidade de água no solo e as condições climáticas de acordo com a sazonalidade do local e a magnitude desses fatores nas trocas gasosas entre a planta - solo - atmosfera, foi realizado um agrupamento dos dados nas datas de todas as campanhas, baseados nas variáveis de precipitação, umidade do solo e umidade relativa. Para isto, foi empregada a técnica de estatística multivariada não hierárquica *K-means cluster*, com base na distância euclidiana com o número de três grupos e centróide como critério de agregação das respostas. Desta forma, foi determinada a avaliação dos dados em: estação seca (agosto/2013), estação intermediária (novembro/2012) e estação chuvosa (março/2012, junho/2012 e março/2013), de acordo com as médias crescentes de cada grupo, respectivamente.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5%. As médias foram apresentadas junto aos desvios padrões das amostras. Foram utilizadas regressões lineares, utilizando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) ajustado entre os valores.

## 3. Resultados e Discussões

Na Figura 3, são apresentados os conteúdos de água no solo nas distintas estações climáticas e a biomassa de raízes, de acordo com as classes de tamanho. Maiores conteúdos de água no solo foram obtidos na época chuvosa, com médias de  $1,16 \text{ mm mm}^{-1}$  no plantio jovem e  $1,04 \text{ mm mm}^{-1}$  no adulto. Embora o solo na época intermediária se encontre mais úmido, este pouco se difere da época seca, com acréscimos de 0,4 e  $0,10 \text{ mm mm}^{-1}$  de água em plantios jovem e adultos e respectivamente.

No plantio jovem aos cinco meses, a umidade do solo média é 70% menor, em comparação aos 17 meses nos períodos chuvosos, porém, com maior variação em profundidade. Pode-se inferir que as perdas de água no solo por evaporação durante o primeiro ano de crescimento do eucalipto são mais acentuadas, haja vista que, neste

período, o sistema radicular se encontra reduzido (Figura 3c) e a serrapilheira ou manta orgânica pouco existente devido à menor quantidade do material senescente (folhas e galhos), quando comparado à fase adulta.

A variação da umidade com a profundidade do solo tem um padrão semelhante entre as camadas intermediárias de 40 a 60 cm em todas as estações no plantio adulto (Figura 3a): é observado menor conteúdo de água, indicando que em períodos de restrição hídrica, este seria o local de maior absorção de água pelo sistema radicular.

As raízes finas apresentam-se com menor peso seco em relação às raízes médias nas duas idades (Figura 3 c,d). Neves (2000) cita que a razão da superfície da raiz fina/média é de 9:1, o que indica que a absorção é mais eficiente pelas raízes finas. É sabido que as raízes finas desempenham um importante papel na captura de água e nutrientes e, em condições de solos mais secos, tendem a ter maior incremento da biomassa e a exploração de maior volume de solo em camadas inferiores (Gonçalves e Mello 2000).

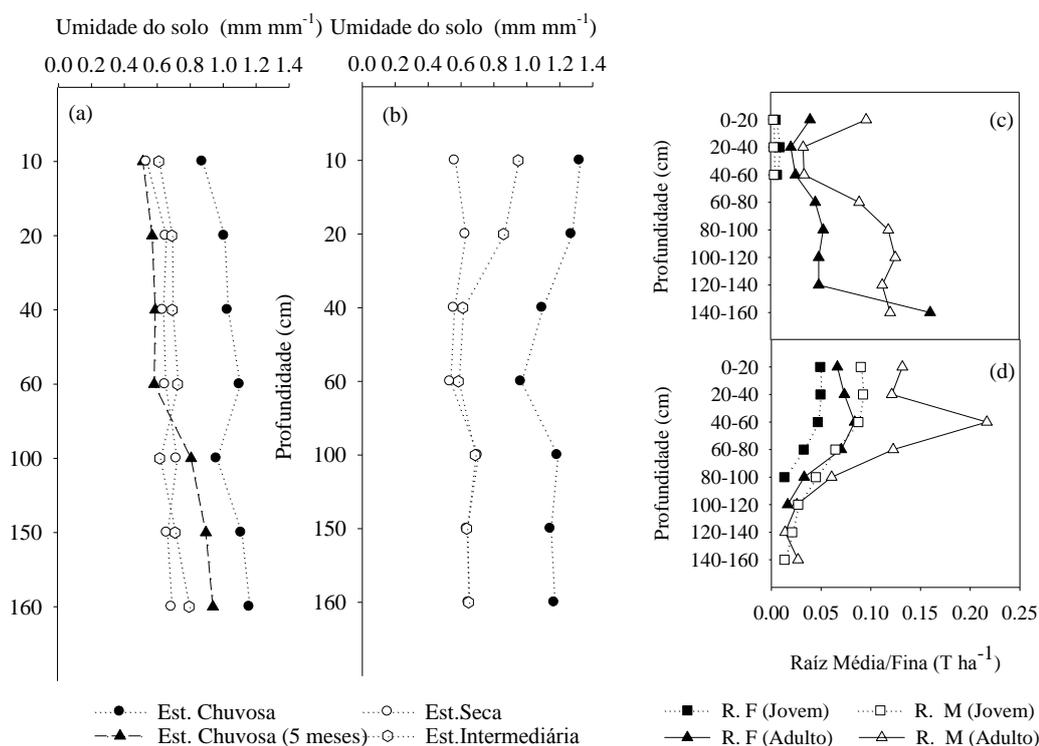


Figura 3. Conteúdo de água no solo em plantios de eucalipto jovem (a) e adulto (b) e biomassa de raízes médias (RM) e raízes finas (RF), nos anos de 2012 (c) e 2013 (d) em relação à profundidade do solo.

Observa-se que o eucalipto obteve incrementos de biomassa ao longo do ciclo de plantio nas idades avaliadas (Figura 4), sendo que nas idades mais jovens, a taxa de assimilação da biomassa total é de 80,4%, sendo esta superior à idade adulta (14,8%), o que corrobora com a hipótese deste trabalho. A biomassa foliar apresentou padrão exponencial de crescimento, indicando que até os 17 meses, o acréscimo foi linear.

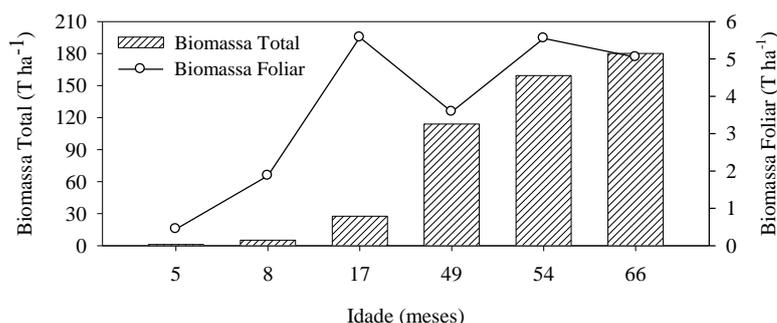


Figura 4. Biomassa total e foliar do eucalipto em seis idades ao longo do ciclo de sete anos.

A fotossíntese líquida média ( $A$ ) apresenta, em geral, padrões distintos ao longo do dia (Figura 5). Pela manhã, entre 7:00 e 8:00h são alcançadas os maiores valores de  $A$ . Após este horário,  $A$  tende a decrescer até próximo de 12:00h. Durante a tarde, observa-se que  $A$  se mantém constante e próximo de zero.

Os valores máximos de  $A$  em período com maior conteúdo de água no solo, são de  $15,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (adulto) e  $27,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (jovens), concordando com os aqueles citados por Whitehead et al. (2004) cuja a variação ficou entre 13,4 a  $25,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em diferentes espécies de *Eucalyptus*. Os autores concluem que a espécie apresenta, em geral, taxas fotossintéticas relativamente altas.

A resposta da planta à sazonalidade climática é verificada no plantio adulto, no qual os valores de  $A$  são mais altos na estação chuvosa comparados aos das estações intermediária e seca, respectivamente. Os efeitos da atmosfera e estresse hídrico na fotossíntese são primariamente causados por mudanças da condutância estomática em resposta ao potencial hídrico foliar e ao DPV (Leuning, 1990), conforme será analisado posteriormente.

Comparando o período seco com o chuvoso no plantio jovem, notam-se maiores valores de  $A$  naquele com ocorrência de chuvas. É observada a ocorrência de

um pico de  $A$  às 7:00 h da manhã na estação seca, superando a estação chuvosa, apenas nesta hora.

Na estação intermediária são verificados valores mais baixos de  $A$  em relação à estação seca ao longo do dia nos plantios jovens. Apesar de um maior suprimento hídrico verificado neste período, a demanda atmosférica é maior com acréscimos de 6,3 °C na temperatura média do ar diária ( $T$ ) e 0,98 Kpa no DPV médio diário, quando comparados à época seca. A relação horária entre as variáveis  $A$  x  $T$  e  $A$  x DPV nesta estação tem um comportamento linear com tendência negativa e  $R^2$  de 0,95 e 0,78 de ajuste entre elas respectivamente, indicando que a variável  $T$  foi a mais influente nesta resposta. As temperaturas médias extremas como a de 35,7 °C no ar e 40,4 °C na folha, observadas às 13:00 h, têm um efeito deletério na fotossíntese e são frequentemente associadas com a fotoinibição (Whitehead et al. 2004), o que pode explicar os valores de zero a partir das 10:00 h da manhã nesta estação.

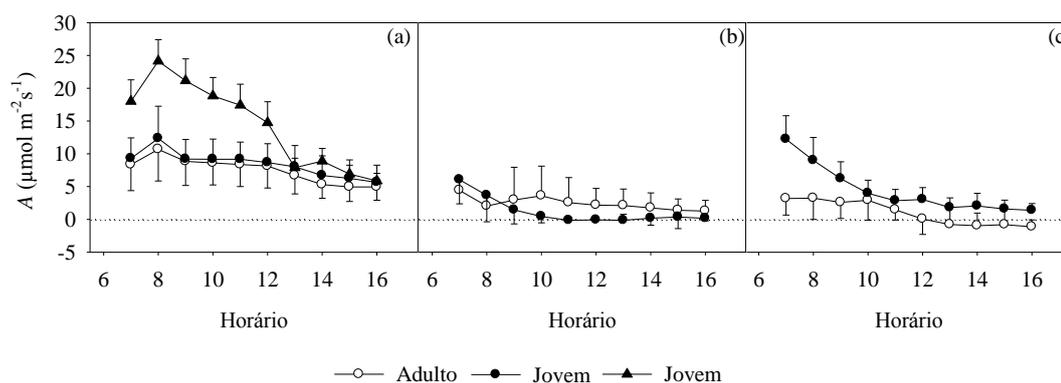


Figura 5. Variação horária da fotossíntese líquida ( $A$ ) nos plantios jovens e adultos nos períodos (a) chuvoso, (b) intermediário e (c) seco. As medidas identificadas pelo triângulo referem-se aquelas realizadas na mesma estação climática, porém em ano anterior às demais curvas.

Foram observadas diferenças estatísticas nos valores médios diários da  $A$  entre as idades jovens e adultas em todas as estações (Tabela 1), sendo que para as estações secas e chuvosas, as médias de  $A$  dos plantios jovens foram significativamente maiores, conforme apresentado nas curvas horárias. Este comportamento resulta em uma maior assimilação do carbono nesta idade e, portanto, maiores taxas de crescimento, conforme verificado na biomassa medida. Em acordo com estes resultados, Marrichi (2009), comparando plantios clonais de 16

a 36 meses, observou valores superiores de  $A$  nos plantios mais jovens presentes no município de Piracicaba (SP), com totais anuais de 1.253 mm.

Os valores de  $g_s$  apresentaram maior variabilidade entre as idades apenas na estação chuvosa. Em uma análise do efeito climático, verifica-se que foram obtidos menores valores de  $g_s$  entre as estações secas e intermediárias sendo que estas não apresentaram diferenças entre si.

Estes resultados podem ser observados em medidas de  $g_s$  em *Eucalyptus* em diferentes plantios e condições climáticas no Brasil. Mielke et al. (1999), avaliando  $g_s$  em plantios clonais de *E. grandis* no Espírito Santo (ES), encontraram valores superiores aos mensurados na idade adulta, com médias diárias de  $0,234 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  em plantios com idades próximas a 8 anos, em sítio com total médio de 1250 mm e temperatura média do ar de  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tatagiba et al. (2007) encontraram valores mínimos de  $0,017 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  e  $1,19 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  de  $g_s$  e  $A$ , respectivamente, em mudas clonais de eucalipto submetidas a déficit hídrico também em experimento conduzido no ES. Os valores de  $g_s$  relatados por Carneiro et al. (2008) variaram entre  $0,12$  e  $0,51 \text{ mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$  no período úmido e de  $0,05$  a  $0,36 \text{ mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$  na estação seca em plantios em clones *Eucalyptus grandis* x *E.urophylla* de 14 meses em Minas Gerais, em regiões com 1173 mm anuais e de temperatura média do ar de  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ . Klippell (dados não publicados, 2012) observou valores médios diários de  $g_s$  de  $0,33$  e  $0,25 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  em plantios de *E. saligna* com idades de dois e quatro anos no Rio Grande do Sul, respectivamente, em região com total médio anual de 1670 mm de chuva e de temperatura média do ar de  $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tabela 1. Valores médios diários da fotossíntese líquida ( $A$ ) e da condutância estomática ( $g_s$ ) para as diferentes estações: chuvosa (C), intermediária (I) e seca (S) nos plantios jovens e adultos de eucalipto.

	Idade (meses)	Estação	$A(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	$g_s(\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$
Jovem	5	C	11,66 <sup>Ba</sup>	0,49 <sup>Ba</sup>
	10	I	0,86 <sup>Bc</sup>	0,02 <sup>Ab</sup>
	17	S	4,64 <sup>Bb</sup>	0,10 <sup>Ab</sup>
Adulto	58	C	8,15 <sup>Aa</sup>	0,15 <sup>Aa</sup>
	56	I	3,13 <sup>Ab</sup>	0,05 <sup>Ab</sup>
	56	S	0,89 <sup>Ab</sup>	0,04 <sup>Ab</sup>

Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de cada idade da planta e minúscula dentro de cada estação não diferem a 5% pelo teste F.

Os valores observados de  $A$  e  $g_s$  apresentam uma relação linear positiva (Figura 6) nas folhas de eucalipto. As boas correlações obtidas refletem o papel da  $g_s$  em regular o suprimento de  $\text{CO}_2$  no processo da carboxilação.

Verifica-se que na estação chuvosa (Figura 5a) e na seca (Figura 5c), os plantios adultos apresentaram as maiores declividades das curvas e interceptos mais próximos de zero. Drake et al (2009) encontraram um  $R^2$  de 0,81 nestas relações em *E. globulus* na Austrália. A menor correlação foi obtida no plantio jovem na época chuvosa, quando foram verificados os maiores valores de  $A$  e  $g_s$ . Pinkard et al. (1998) também observaram existir esta tendência em não obter boas relações entre  $A$  e  $g_s$  em altos valores de  $g_s$  em plantios de *E. nitens* aos três anos de idade.

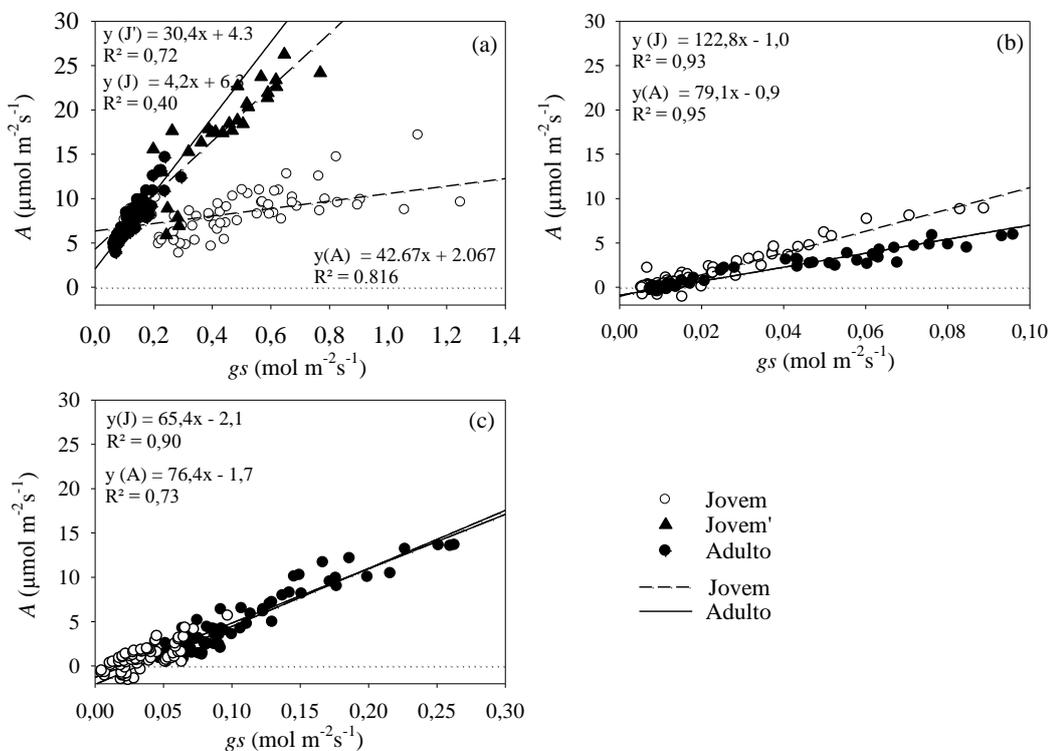


Figura 6. Dispersão dos dados de fotossíntese líquida ( $A$ ) e condutância estomática ( $g_s$ ) dos plantios jovens (J) e adultos (A) nas estações chuvosas (a), intermediárias (b) e secas (c). As dispersões identificadas pelo triângulo referem-se aquelas realizadas na mesma estação climática, porém em ano anterior às demais curvas.

A Figura 7 apresenta o curso horário da transpiração ( $E$ ) medida para os três períodos climáticos e idades avaliadas. Em geral, as árvores adultas apresentam maiores valores de transpiração entre os horários de 10:00 as 12:00 h. O mesmo é observado para as plantas jovens somente na estação chuvosa.

Durante a estação chuvosa (Figura 7a), os valores de  $E$  do jovem aos 17 meses pouco se diferencia da idade adulta, com valores médios diários de  $2,27 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $2,24 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  respectivamente, diferentemente daquele aos cinco meses ( $7,76 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Deve-se ressaltar que estes resultados são pontuais e em nível foliar, o que provavelmente se difere na integração para o dossel visto que a densidade de folhas aumenta significativamente nestas idades.

A deficiência hídrica afetou mais intensamente o  $E$  nas duas idades, e, tem como consequência a redução da perda de água pelo fechamento estomático. Embora se observe um pico no princípio da manhã, os valores médios diários dos plantios jovens ( $1,60 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e adultos ( $0,68 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) são inferiores comparados à estação chuvosa. Os valores inferiores presentes na estação intermediária em relação à seca no plantio jovem, reflete as condições climáticas mais restritivas neste período, conforme resultado verificado em A, discutido anteriormente. As medidas apresentaram-se mais homogêneas, com pequenos desvios padrões entre as amostras ao longo do dia.

Os dados de  $E$  seguiram a mesma tendência de comportamento de  $g_s$ , conforme tem sido observado por alguns autores (Mielke et al. 1999 e Chaves, 2001), uma vez que a transpiração se dá, principalmente, pela perda de água pelos estômatos (Kramer e Boyer, 1995).

Quando a umidade do solo é maior, conforme observado na estação chuvosa (Figura 4), a tensão pela qual a água está aderida às partículas de solo é menor (Carneiro et al. 2008), indicando que uma menor demanda atmosférica é necessária para que o processo de transpiração seja intensificado. Assim, neste período pouca energia é capaz de intensificar a abertura estomática para que a transpiração se torne superior.

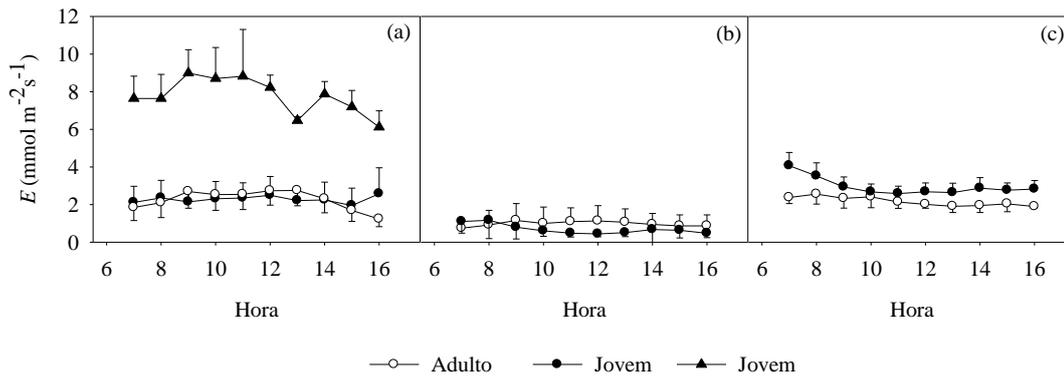


Figura 7. Curso horário da transpiração ( $E$ ) nos plantios adultos e jovens nos períodos (a) chuvosos, (b) intermediário e (c) secos. As medidas identificadas pelo triângulo referem-se aquelas realizadas na mesma estação climática, porém em ano anterior às demais curvas.

A  $EUA$  e a  $EUA_i$  apresentam uma relação exponencial decrescente com o DPV, sendo que no plantio jovem, o  $EUA_i$  apresentou menor  $R^2$  (Figura 8). Observa-se um bom ajuste dos dados para ambas as idades.

Os valores médios diários foram maiores na época chuvosa em relação à época seca para o  $EUA$  e o inverso ocorre apenas para a  $EUA_i$  no plantio chuvoso para ambas as idades. Na estação seca, o plantio jovem foi aquele com maiores  $EUA$  ( $2,59 \mu\text{mol mmol}^{-1}$ ) e  $EUA_i$  ( $40,27 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ) em relação ao plantio adulto ( $-1,46$  e  $-20,42 \mu\text{mol mmol}^{-1}$  de  $EUA$  e  $EUA_i$ ). Este melhor ajustamento é um mecanismo que facilita a aclimação da planta em permitir continuar a incorporação de carbono para a biomassa, evitando a perda excessiva de água quando exposta aos fatores ambientais em condições mais limitantes. Baesso (2012) mensurou a  $EUA_i$  em plantios de eucalipto, porém esta foi maior nos plantios jovens em relação ao adulto em ambas as estações climatológicas.

Os valores de  $EUA$  tenderam a reduzir ao longo do dia, sendo que esta variação foi bastante acentuada quando se observou restrição hídrica somada aos maiores DPV's. Isso pode ser explicado pela maior condutância estomática observada nas primeiras horas do dia, associada à maior concentração de dióxido de carbono devido ao acúmulo noturno. Carneiro et al. (2008), analisando a  $EUA$  diurna para os diferentes períodos do ano em clones de eucalipto, também verificaram que, de maneira geral, existe uma maior eficiência do uso da água nas primeiras horas da manhã.

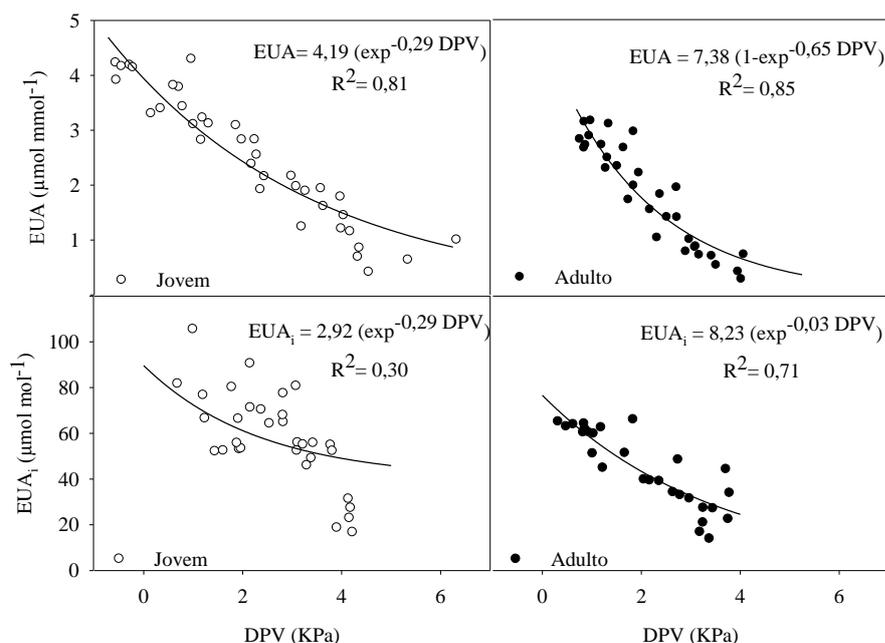


Figura 8. Eficiência do uso da água (EUA) e a eficiência intrínseca do uso da água (EUA<sub>i</sub>) e o déficit de pressão de vapor (DPV) em escala horária em plantios jovens e adultos de eucalipto.

Os valores do IAF e AFE no plantio jovem foram crescentes com uma posterior redução no plantio adulto (Tabela 2). Almeida e Soares (2003) citam a existência de uma relação exponencial entre o IAF e a idade em plantios de eucalipto.

Os maiores valores de IAF observados aos 17 meses indicam que, além do bom suprimento hídrico, não havia ocorrido o fechamento do dossel, levando a uma melhor distribuição da radiação ao longo do dossel jovem e ao aumento da capacidade fotossintética das folhas que se encontram nos estratos inferiores do dossel.

A relação que descreve a redução do IAF e da AFE em períodos com menor oferta hídrica tem suporte nos resultados encontrados no plantio adulto. Ferreira (1996) relata que decréscimos na AFE indicam aumento na espessura da folha, o que é caracterizado como um mecanismo de defesa contra a perda d'água na estação seca. Nesta estação, os valores observados de  $A$ ,  $g_s$  e de  $E$  mais baixos. Estes resultados refletem uma menor interceptação da radiação fotossinteticamente ativa pelo dossel foliar e conseqüentemente uma redução do carbono incorporado por superfície foliar e do dossel.

Tabela 2. Valores médios e coeficiente de variação (CV) dos dados da área foliar específica (AFE) e índice de área foliar (IAF) dos plantios jovens e adultos nas diferentes estações climáticas secas (S) e chuvosas (C).

Plantio	Campanha	Idade (meses)	AFE ( $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ )		IAF ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ )	
			Média	CV (%)	Média	CV (%)
Jovem	C	5	7,64 ± 0,21	2,79	0,27 ± 0,03	9,18
	S	10	8,43 ± 0,40	4,72	2,06 ± 0,30	14,36
	C	17	9,54 ± 0,59	6,16	5,35 ± 0,28	5,27
Adulto	S	58	6,32 ± 0,21	3,36	3,84 ± 0,68	17,77
	C	65	8,32 ± 1,27	15,32	4,47 ± 0,87	19,57

A resposta de  $A$  às diferentes variações da concentração interna ( $CI$ ) indicam como os processos mesofílicos são afetados na folha (Figura 9). A dispersão dos dados se apresenta em curvas exponenciais crescentes e, para ambas as idades, os dados apresentaram boas correlações.

Esta relação é linear na fase inicial, em que a taxa de carboxilação máxima pela Rubisco ( $V_{c,Max}$ ), dada pelo coeficiente angular do incremento inicial de  $A$  em função de  $CI$ , é significativamente maior no plantio jovem ( $p < 0,05$ ). Os valores médios do  $V_{c,Max}$  foram 133 e 74  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  em plantios jovens e adultos, respectivamente, sendo observada uma diferença de 55% entre as idades trabalhadas.

Os plantios jovens apresentam uma taxa de transporte de elétrons na regeneração da RuBP ( $J_{max}$ ) superior (143  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) ao eucalipto adulto (111  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ). Assim, pode-se inferir que nesta idade, ocorre uma maior capacidade de regeneração desta enzima quando as concentrações atmosféricas de  $\text{CO}_2$  são inferiores (Farquhar e Sharkey, 1982; Long e Bernarchi, 2003).

Cabe ressaltar que, além do fator metabólico em que são visualizadas maiores taxas fotossintéticas do eucalipto aos cinco meses, as condições do ambiente favoreceram os maiores valores de  $V_{c,Max}$  e  $J_{max}$  nesta idade visto que o conteúdo de água no solo do plantio adulto era 24% menor e o DPV na ordem de 1,17 Kpa superior, o que contribui com as diferenças encontradas.

Os dados de  $V_{c,Max}$  e  $J_{max}$  foram bem correlacionados entre si ( $R^2 = 0,81$ ), assim como os apresentados por Marrichi (2009) e por Manter e Kerrigan (2004). A alta relação entre estas variáveis indica que a assimilação de  $\text{CO}_2$ , verificada em todas as idades avaliadas, é regulada de uma maneira coordenada por estes dois processos (Warren e Adams, 2001).

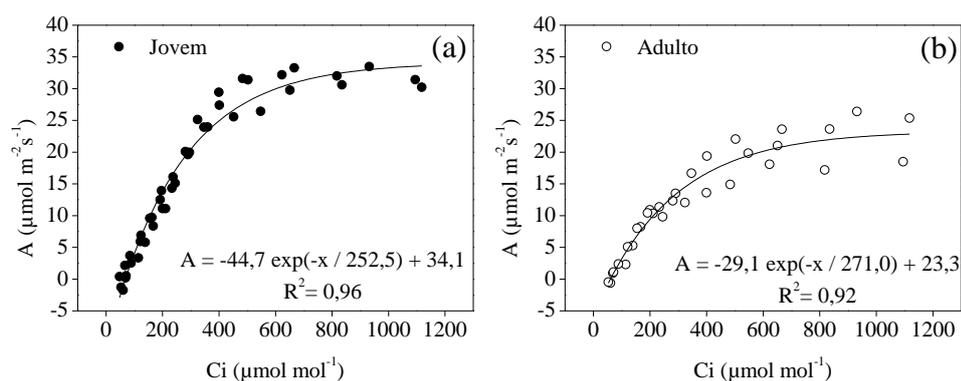


Figura 9. Regressão das curvas  $A/C_i$  em plantios de eucalipto jovens (a) e adultos (b) avaliados em época de bom suprimento hídrico. São expostos os valores da taxa de carboxilação máxima pela Rubisco ( $V_{c,Max}$ ) e da taxa de transporte de elétrons para regeneração da RuBP ( $J_{max}$ ) em idades jovem e adulto.

O plantio jovem apresenta padrões diferenciados no curso noturno da respiração sendo as noites mais quentes, aquelas com menor respiração ( $0,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). A época de maior amplitude diária se inverte para a estação seca ( $3,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ), quando foi observado um incremento do fluxo respiratório em relação às demais estações climáticas.

A respiração foliar noturna no plantio adulto foi maior na época chuvosa, com valores médios de  $1,25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Figura 10a), seguidos de  $0,71 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  na intermediária (Figura 10b) e valores menores ( $0,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) na época seca (Figura 10c). É observado um aumento da amplitude térmica foliar noturna na época chuvosa, com variação de  $5,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , havendo uma maior amplitude também do fluxo de carbono respirado ( $0,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) neste período.

Ao avaliar a relação dos valores máximos de  $A$  (8:00 a 10:00 h) e  $R$  (22:00 as 00:00 h, em geral) em cada campanha e entre as idades, foi verificado uma correlação de 0,73 entre estas variáveis. Esta relação supera a de Lewis et al. (2011) em plantios de *Eucalyptus*, que encontraram correlação de 0,44 sendo, porém, avaliadas seis espécies do gênero. Estes processos fisiológicos se interrelacionam por diversas interações na assimilação de nitrogênio, produção de ATP, aclimatação de estresses (Ribas-Carbo et al. 2005; Foyer et al. 2006) e podem ser relacionados sobretudo, devido ao papel dos carboidratos gerados por  $A$  como substratos de  $R$  (Whitehead et al. 2004; Tjoelker et al, 2008).

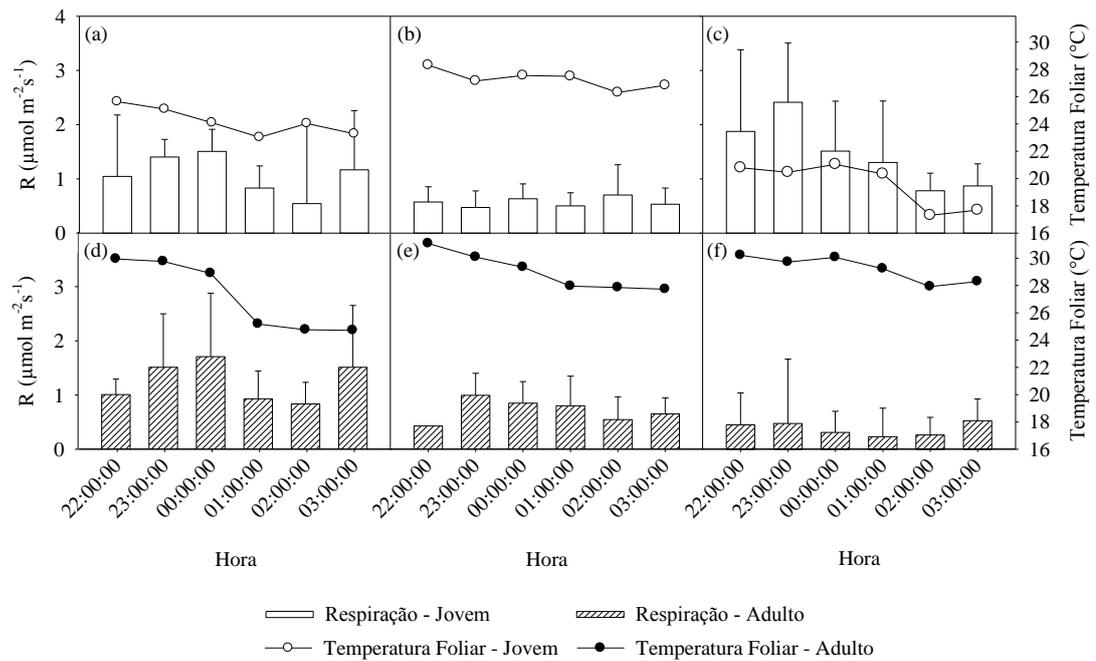


Figura 10. Curso noturno da respiração foliar ( $R$ ) em plantios de eucalipto em idades jovem (a,b,c) e adulta (d,e,f) nas estações chuvosas (a,d), intermediárias (b,e) e secas (c,f).

Diversos estudos têm mostrado a relação da respiração com a temperatura, em flutuações sazonais e diárias (Loveys et al. 2003; Clark, 2004). Porém, quando se analisa a interação entre as estações climáticas estudadas, esta relação se inverte, sendo que os períodos mais quentes, apresentaram fluxos reduzidos (Figura 11a).

Os gráficos da Figura 11 b,c expõem que, apesar da respiração foliar responder de forma integrada às variáveis climáticas, aquelas relacionadas aos recursos hídricos, parecem exercer maior influencia neste processo. Nos períodos de maior disponibilidade energética, havia menor umidade relativa do ar, umidade do solo, e aumento do DPV, o que contribuiu para os menores fluxos respiratórios encontrados. Nos gráficos são destacados *outliers* em dados correspondente à época seca que foram removidos ao gerar as curvas por não fazerem parte da tendência média das curvas lineares (temperaturas) e exponenciais (DPV e UR).

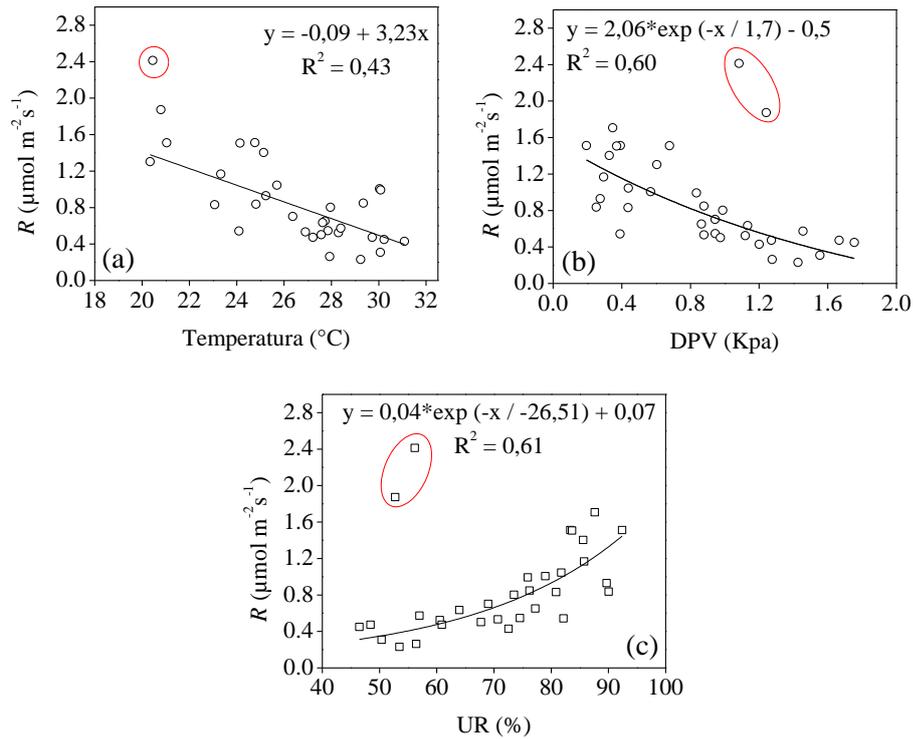


Figura 11. Dispersão dos dados de fluxos respiratórios dos plantios jovens e adultos de eucalipto em relação aos dados meteorológicos de temperatura foliar (a), déficit de pressão de vapor (DPV) (b), e umidade relativa (UR) (c).

#### 4. Conclusões

Os resultados deste estudo corroboram com as hipóteses de trabalho. Em geral, verifica-se uma tendência dos plantios jovens a realizarem maiores trocas gasosas, provavelmente devido às maiores taxas de crescimento, do IAF, e das raízes. A eficiência do uso da água foi maior nestas idades em condições de restrição hídrica.

Os plantios de eucaliptos mostraram aumentos nos fluxos de vapor d'água e assimilação de carbono em épocas com maiores disponibilidades hídricas.

A respiração foliar noturna é melhor explicada pela menor demanda atmosférica, como baixo DPV e altas umidades relativas do ar. No período seco, os plantios jovens apresentaram maior taxa de respiração comparada aos adultos.

## 5. Referências Bibliográficas

Abraf – Associação Brasileira Florestal. *Anuário Estatístico da ABRAF 2012 -Ano Base 2011*. <http://www.abraflor.org.br/>. Acessado em 15 de maio de 2013.

Amthor, J.S.; Baldochi, D.D. Canopy photosynthesis: history, measurements, and models. In: Roy, J.; Saugier, B.; Mooney, H.A. (Ed.). *Terrestrial global productivity*. San Diego: Academic Press, 2001. chap. 2, p. 9-32.

Adams MA. Distribution of eucalypts in Australian landscapes: landforms, soils, fire and nutrition. In: Attiwill PM, Adams MA, eds. *Nutrition of eucalypts*. Melbourne: CSIRO, p. 61–76, 1996.

Almeida, A. C; Soares, J. V. Comparison of water use in *Eucalyptus grandis* plantations and Atlantic Rainforest in eastern coast of Brazil. *Revista Árvore*, v.27, p. 159-170, 2003.

Baesso, R. C. E. *Efeito do CO<sub>2</sub> na eficiência quântica do eucalipto e sua utilização na modelagem de seu crescimento pelo 3-PG*. 2012. 130 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa.

Boland DJ, Brooker MIH, Chippendale GM, Hall N, Hyland BPM, Johnson RD, et al. *Forest trees of Australia*. Melbourne: CSIRO, 2006.

Booth, T.H. Eucalypt plantations and climate change. *Forest Ecology and Management*, v.301, p. 28–34, 2013.

Carneiro, R. L. C.; Ribeiro, A.; Huaman, C. A. M.; Leite, F. P.; Sedyama, G. C.; Barros, N. F. Consumo de água em plantios de eucalipto - Parte 1: Determinação da condutância estomática em tratamentos irrigados e não irrigados. *Revista Árvore*, v. 32, p. 1-10, 2008.

Chaves, J.H.; Reis, G.G.; Reis, M.G.F.; Neves, J.C.L.; Pezzopane, J.E.M.; Polli, H.Q. Seleção precoce de clones de eucalipto para ambientes com disponibilidade diferenciada de água no solo: relações hídricas de plantas em tubetes. *Revista Árvore*, v. 28, n. 3, p. 333-341, 2004.

Clark, D.A. Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. *Philosophical Transactions of The Royal Society of London*, London, v. 359, n. 1443, p. 477-491, 2004.

Dovey, S.B.; Du Toit, B. Calibration of LAI-2000 canopy analyser with leaf area index in a young eucalypt stand. *Trees*, v.20, p. 273–277, 2006.

Drake P.L., Mendham D.S., White D.A. & Ogden G.N. A comparison of growth, photosynthetic capacity and water stress in *Eucalyptus globulus* Labill coppice regrowth and seedlings during early development. *Tree Physiology*, v. 29, p. 663–674, 2009.

Ferreira, E. Ajustamento osmótico e análise de crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.), em função do nível de potássio e estresse hídrico. 1996. Tese (Doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

Fibria. Monitoramento de Flora e Fauna. Relatório interno.88 p. 2011.

Foyer, C. H., Noctor, G., and Verrier, P. Photosynthetic carbon-nitrogen interactions: Modelling inter-pathway control and signalling, In: *Control of Primary Metabolism in Plants*. pp. 325–34x.Plaxton, W. C. and McManus, M. T., Eds., Annual Plant Reviews, v. 22, Blackwell Publishing, Oxford. 2006.

Gonçalves J.L.M., Mello, S.L.M. (2000) O sistema radicular das árvores. In: Gonçalves, J.L.M., Benedetti, V. (eds.) *Nutrição e fertilização florestal*.Piracicaba: IPEF, 2000. p. 221-267.

Lavigne, M. B.; Ryan, M. G. Growth and maintenance respiration rates of aspen, black spruce and jack pine stems at northern and southern BOREAS sites. *Tree Physiol.*, v. 17, p. 543–551, 1997.

Harwood, C. Introductions: doing it right. In: Walker, J. (Ed.), *Developing a Eucalypt Resource. Learning from Australia and Elsewhere*. Wood Technology Research Centre, University of Canterbury, New Zealand, 2011; p. 43–54.

Hubbard, R.M.; Stape, J.; Ryan, M.G.; Almeida, A.C.; Rojas, J. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 259, p. 1714–1721, 2010.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. 2006

J. Flexas, M. Ribas-Carbo´, A. Diaz-Espejo, J. Galme´s, H. Medrano, Mesophyll conductance to CO<sub>2</sub>: current knowledge and future prospects, *Plant Cell Environ*, v. 31, p. 602-621, 2008.

Katul G., Leuning R. & Oren R. Relationship between plant hydraulic and biochemical properties derived from a steadystate coupled water and carbon transport model. *Plant, Cell & Environment*, v.26,p.339–350, 2003.

Kramer, P. J., Boyer, J. S. *Water relations of plants and soils*.San Diego, 1995. 495p.

Leuning, R. (1990). Modeling stomatal behavior and photosynthesis of *Eucalyptus grandis*.*Australian Journal of Plant Physiology*,v. 17, n. 2, p. 159-175.

Long, S.P.; Bernacchi, C.J. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? Procedures and source of errors.*Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2393-2401, 2003.

Loveys, B.R.; Atkinson, L.J.; Sherlock, D.J.; Roberts, R.L.; Fitter, A.H.; Atkin, O.K. Thermal acclimation of leaf and root respiration: an investigation comparing inherently fast- and slow-growing plant species. *Global Change Biology*, Oxford, v. 9, n. 6, p. 895-910, 2003.

Machado, E.C.; Schmidt, P.T.; Medina, C.L.; Ribeiro, R.V. Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 40, p. 1161-1170, 2005.

Manter D.K., Kerrigan J. . 2004. A/Ci curve analysis across a range of woody plant species: influence of regression analysis parameters and mesophyll conductance. *J. Exp. Bot.*, v. 55, p. 2581–2588.

Marri, A. H. C. *Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em sete clones comerciais de Eucalyptus e seus padrões de resposta ao déficit de pressão de vapor*. Dissertação (Mestrado). 2009. 105 f. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

Mielke, M. S.; Oliva, M. A.; Barros, Penchel, R. M N. F.; Martinez, F. B.; Fonseca, S.; Almeida, C. A.. Leaf gas exchange in a clonal eucalypt plantation as related to moisture, leaf water potential and microclimate variables. *Trees*, v. 14, p. 263-270, 1999.

Penman, H. L. Evaporation, transpiration and evapotranspiration. *In: Vegetation and Hydrology*. Farnham Royal, Comm. Agric. Bureaux. 1963.

Pereira, J. S.; Tenhunen, J. D.; Lange, O. L.; BEyschlag, W.; Meyer, A.; David, M. M. Seasonal and diurnal patterns in leaf gas Exchange of *Eucalyptus globulus* trees growing in Portugal. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v. 16, p. 177-184, 1986.

Pinkard, E.A. et al. Modelling the effect of physiological responses to green pruning on net biomass production of *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden. *Tree Physiology*, v. 19, p. 1-12, 1998.

Ribas-Carbo, M., Taylor, N. L., Giles, L., Busquets, S., Finnegan, P. M., Day, D. A., Lambers, H., Medrano, H., Berry, J. A., and Flexas, J. Effects of water stress on respiration in soybean (*Glycine max.* L.) leaves. *Plant Physiol.*, v. 139, p. 466–473, 2005.

Sands, R.; Mulligan, D. R. Water and nutrient dynamics and tree growth. *Forest Ecology and Management*, n.30, p. 91-111, 1990.

Sentek Pty Ltd., EnviroSCAN Software. Manual, Version 4, 124 p. 1999.

Sharkey T.D., Bernacchi C.J., Farquhar G.D. & Singsaas E.L. Fitting photosynthetic carbon dioxide response curve for C3 leaves. *Plant, Cell & Environment*, v. 30, p. 1035–1040, 2007.

Tatagiba, S.D.; Pezzopane, J. E. M.; Reis, E. F.; Dardengo, M.C. J. D.; Effgen, T.A.M. Comportamento fisiológico de dois clones de *Eucalyptus* na época seca e chuvosa. *Cerne*, v. 13, n. 2, p. 149-159, 2007.

Tjoelker, M.G., J. Oleksyn, P.B. Reich and R. Zytkowskiak. Coupling of respiration, nitrogen, and sugars underlies convergent temperature acclimation in *Pinus banksiana* across wide-ranging sites and populations. *Glob. Change Biol.*, v. 14, p. 782–797, 2008.

Vose, J. M.; Swank, W. T. Effect of long-term drought on the hydrology and growth of a white pine plantation in the southern Appalachians. *Forest Ecology and Management*, n. 64, p. 25-39, 1994.

Warren, C. R; Chen, Z. L; Adams, M. A. Effect of N source on concentration of Rubisco in *Eucalyptus diversicolor*, as measured by capillary electrophoresis. *Physiologia Plantarum*, Oxford, v. 110, p. 52–58, 2000.

Warren, C.R., G.J. Ethier, N.J. Livingston, N.J. Grant, D.H. Turpin, D.L. Harrison and T.A. Black. Transfer conductance in second growth Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) canopies. *Plant Cell Environ.*, v. 26, p. 1215–1227, 2003a.

Whitehead W, Beadle C. L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *For Ecol Manage*, v. 193, p. 113–140, 2004.

Zavattini, J. A. *Estudos do Clima no Brasil*. Campinas, Alínea, 2004, 398p.

Zhang, S.; Li, Q.; Ma, K.; Chen, L. Temperature dependent gas exchange and stomatal/non-stomatal limitation to CO<sub>2</sub> assimilation of *Quercus liaotungensis* under midday higher irradiance. *Photosynthetica*, Prague, v.39, p. 383-388, 2001.

## CAPÍTULO II

### RESPIRAÇÃO E PARTIÇÃO DE FONTES CO<sub>2</sub> E DA RAZÃO ISOTÓPICA DO CARBONO EM PLANTIOS DE EUCALIPTO

#### RESUMO

O presente estudo foi realizado para investigar as variações temporais entre os fluxos respiratórios e os isótopos de carbono em componentes da parte aérea e abaixo do solo em árvores de eucalipto jovens e adultos. O trabalho foi feito em dois talhões em plantios clonais de *E. grandis* de cerca de 100 ha, com idades entre 10 e 15 meses (jovem) e 58 e 63 meses (adulto) em áreas de plantios comerciais de eucalipto da empresa Fibria no Estado do Mato Grosso do Sul. Foram alocadas sistematicamente cinco parcelas fixas em cada um dos talhões e subparcelas com ausência de serrapilheira. Para obtenção dos dados meteorológicos, foram instaladas estações meteorológicas automáticas em uma torre presentes em cada talhão. Buscando avaliar a resposta das plantas à sazonalidade climática, foram realizadas campanhas de medidas ecofisiológicas e biométricas no período seco (agosto/2012) quando foi verificado intenso déficit hídrico e em períodos chuvosos (fevereiro/2013). Realizou-se a análise destrutiva para expressar a incorporação da biomassa em ambas idades e em distintos portes arbóreos. A razão isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) e o fluxo do CO<sub>2</sub> foram determinados nos componentes autotróficos e heterotróficos. As medidas do  $\delta^{13}\text{C}$  e da concentração do CO<sub>2</sub> no ambiente do ecossistema foram feitas ao longo da torre e acima do dossel. Para determinação do  $\delta^{13}\text{C}$  respirado utilizou-se a abordagem *Keeling plot* nas medidas de organismos autotróficos e do ecossistema. Para verificar a relação da contribuição da respiração da parte aérea e abaixo do solo em relação à respiração total do plantio, utilizou-se o software IsoSource (Phillips, 2001). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e comparados pelo teste de Tukey. Em uma análise por idade, o plantio jovem apresentou maiores fluxos respiratórios de CO<sub>2</sub> nas folhas e raízes. Verificou-se que os fluxos respiratórios dos órgãos das árvores do plantio jovem e o adulto, em portes médios e dominantes, foram distintos entre as estações climáticas com maiores médias no período chuvoso. As folhas são o componente que apresentaram maiores valores médios de fluxo por árvore. Observaram-se boas correlações nos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  do CO<sub>2</sub> respirado determinados pelo método do *Keeling plot*, indicando ser uma metodologia aplicável a câmaras. Não houve diferença estatística entre a  $\delta^{13}\text{C}$  de nenhum dos órgãos avaliados nos plantios jovem e adulto na estação chuvosa. Este resultado se difere para as folhas e os galhos na estação seca. A contribuição particionada dos indivíduos autotróficos e heterotróficos gerada a partir dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  sugeriu que 51,7% é relacionado à parte aérea do ecossistema e logo, 48,3% é provida da respiração do solo e seus componentes.

**Palavras Chave:** Balanço de Carbono, *Keeling plot*, particionamento.

## 1. Introdução

Aumentos na concentração do gás carbônico (CO<sub>2</sub>) atmosférico têm sido observados e várias evidências indicam mudanças significativas no clima terrestre (Revelle, 1982; IPCC, 2007). Diante disto os governos têm debatido sobre formas de minimizar essas emissões, no contexto das mudanças de uso do solo, visto que estas podem modificar padrões de temperatura do ar e albedo da superfície (Randow et al. 2004) levando a alteração do balanço de energia e, conseqüentemente, do clima.

As florestas são importantes sumidouros de carbono (C) atmosférico em uma escala global (IPCC, 2001). O estoque de C indica o potencial dessas coberturas em sequestrar o C da atmosfera, mitigando as mudanças climáticas por gases de efeito estufa, em especial o CO<sub>2</sub>. A significância dos processos líquidos no ecossistema florestal não pode ser realizada ao menos que seja analisada do ponto de vista do balanço entre a produção bruta e a respiração de indivíduos autotróficos e heterotróficos (Kira e Shidei, 1967).

A respiração das plantas é um dos mais importantes processos bioquímicos de trocas de carbono entre a vegetação e a atmosfera. Embora a minimização da perda respiratória de CO<sub>2</sub> possa ser visto como desejável para melhorar a eficiência do uso do C pela planta, este processo é fundamental para sustentar o crescimento e produção de biomassa. Plaxton e Podestá (2006) citam que a respiração das plantas tem funções diversas como a produção de ATP, interações entre a assimilação de C e nitrogênio (Foyer et al. 2006), otimização da fotossíntese (Raghavendra e Padmasree, 2003), aclimação de estresses (Ribas-Carbo *et al.* 2005), dentre outros.

Para explicar a distribuição das fontes e drenos de C terrestre, é necessário um melhor entendimento dos fatores que controlam a troca líquida do ecossistema (Ciais et al, 1995, Giardina e Ryan, 2000; Janssens et al. 2001). Espécies florestais de rápido crescimento, como o eucalipto tendem a promover um maior incremento de biomassa em tempo reduzido e conseqüentemente, aumento no estoque de C fixado na biosfera. Por outro lado, a respiração total pode ser também aumentada em função de variáveis como a temperatura e a precipitação (Ryan et al, 2009) e se tornar um fator determinante na assimilação líquida de carbono. A respiração autotrófica supre energia para o metabolismo e o crescimento, com um consumo que pode variar de 30 a 70% do carbono fixado na fotossíntese (Litton et al. 2007).

Entretanto, são poucos os estudos sobre o papel da respiração autotrófica no balanço de carbono das árvores.

Anteriormente, as pesquisas relacionadas à incorporação do CO<sub>2</sub> atmosférico na planta eram provindas principalmente em componentes da parte aérea. No entanto, verifica-se a necessidade de realizar a partição da respiração nos componentes acima e abaixo do solo para se obter uma compreensão mais profunda das respostas do ecossistema às variações sazonal e interanual na variabilidade da respiração e auxiliar no desenvolvimento de modelos do ciclo do C em ecossistemas (Aber et al. 1996). Ainda assim, dados da respiração abaixo do solo podem ser difíceis de interpretar, dadas as incertezas associadas a distúrbio, técnicas de medição e quantificação de CO<sub>2</sub> dos diferentes componentes abaixo da superfície do solo.

Durante a fotossíntese, as plantas que possuem como primeiro produto estável uma molécula com três carbonos (plantas C3), como o eucalipto, incorporam preferencialmente o isótopo <sup>12</sup>C. Durante a respiração das plantas, o C retornado para a atmosfera tem o valor da razão isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ou a razão entre os isótopos de maior e menor massa, empobrecido, refletindo o carbono previamente assimilado. Este sinal isotópico é resultado das diferenças nas taxas de difusão do <sup>12</sup>C e <sup>13</sup>C nas folhas e em especial, nas reações com a rubisco na carboxilação. Durante a fotossíntese, verifica-se a assimilação do CO<sub>2</sub> atmosférico, e os produtos são o incremento das biomassas foliares ou açúcares fotossintéticos. Na respiração, o substrato é mais difícil definir, e na tentativa de melhor elucidar este processo, o produto (CO<sub>2</sub> respirado) é geralmente comparado a diferentes substratos para a respiração como a glicose, amido, lipídios, etc. (Bowling, 2008).

Os isótopos estáveis do carbono podem ser usados para traçar padrões e verificar mecanismos fisiológicos, associados com a fotossíntese e respiração no ecossistema (Yakir e Wang 1996; Ogée et al., 2003). Esta técnica tem permitido aos cientistas avanços no entendimento sobre o carbono, os ciclos da água em escalas que vão de processos metabólicos da folha (Badeck et al. 2005) a global (Griffis, 2013).

Alguns estudos em que são comparados o  $\delta^{13}\text{C}$  do carbono respirado e o  $\delta^{13}\text{C}$  da biomassa vegetal apresentaram diferenças inconsistentes na respiração, às vezes mais enriquecido ou mais empobrecido (Park e Epstein, 1961; Farquhar et al. 1982) e valores de  $\delta^{13}\text{C}$  determinados principalmente pela composição isotópica da biomassa da planta e o carbono orgânico do solo (Merchant et al. 2011, Grossiord et al. 2012).

Assim, assume-se que o fracionamento na respiração autotrófica seja pequeno e não detectável pela técnica na avaliação dos principais fatores que controlam a composição isotópica das plantas (Yakir e Sternberg, 2000; Duranceau et al. 1999; Gillon e Griffiths, 1997). Por esta razão, a discriminação respiratória é normalmente referida como discriminação respiratória aparente (Bowling et al. 2008).

Dada a importância de se entender melhor os processos que determinam o balanço de carbono em plantios florestais de rápido crescimento, este estudo foi realizado para investigar as relações temporais entre os fluxos respiratórios de CO<sub>2</sub> e os isótopos de carbono assimilados em componentes da parte aérea e abaixo do solo em árvores de eucalipto em idades jovens e adultas.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Áreas de estudos

Trabalhou-se no município de Brasilândia, Estado do Mato Grosso do Sul em áreas de plantios comerciais da empresa Fibria. O município encontra-se localizado na unidade geomorfológica do Planalto Sedimentar do Paraná. O clima da região é o tropical, quente e semi úmido, do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, sendo marcado por chuvas no verão e períodos secos durante o inverno com totais anuais médios de 1300 mm de precipitação e temperaturas médias históricas variando de 21,2 a 27,0 °C de acordo com as normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A vegetação nativa da região pertence ao bioma Cerrado com a tipologia Cerradão, em estágio médio de regeneração. Em alguns trechos ocorrem sinais de perturbação com dossel descontínuo e alta densidade de espécies de *Poaceae* (taquaras) (Fibria, 2011).

Os locais de estudo estão representados na Figura 1. Trabalhou-se em dois talhões de plantios clonais híbridos de *E. grandis* nas idades de 12 e 18 meses (jovem) e 59 e 65 meses (adulto). Ambos os plantios possuem espaçamento de 3,6 x 2,5 m e áreas de 81,1 e 63,3 ha nos plantios adultos e jovens respectivamente.

O talhão jovem corresponde ao solo Latossolo Vermelho distrófico Espessarênico (Lvd2), com textura média leve. O talhão adulto corresponde ao Latossolo Vermelho distrófico típico (Lvd5), com textura média pesada.

Foram alocadas sistematicamente cinco parcelas fixas de 30 x 30 m por talhão, e subparcelas de 3 x 9 m alocadas para isolar a deposição da serrapilheira ao longo do período de medidas.

Os plantios adulto e jovem correspondem a área de implantação e de segundo ciclo, respectivamente, onde haviam anteriormente área de pastagens.

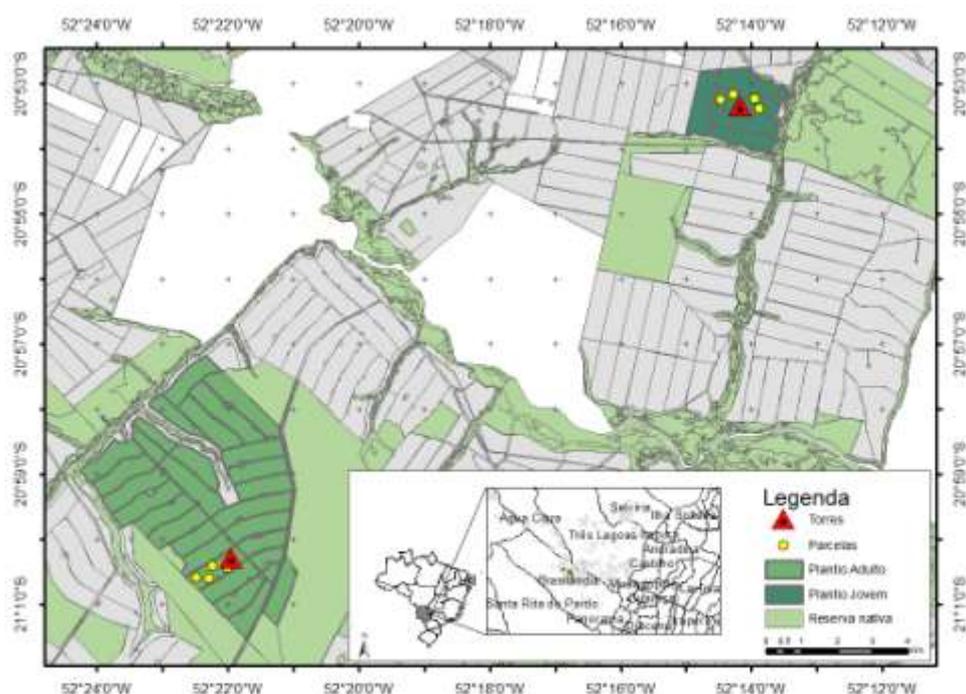


Figura 1. Localização geográfica das torres micrometeorológicas e parcelas alocadas nos plantios jovem e adultos de eucalipto.

## 2.2. Dados meteorológicos

Foram instaladas estações meteorológicas automáticas (EMA's) em duas torres presentes nos talhões dos plantios jovem e adulto. Cada torre conta com os seguintes sensores instalados à uma distância de quatro metros do dossel: piranômetro, modelo LI-200SA (Li-cor, Nebraska, USA) para medidas da radiação solar global; saldo radiômetro, modelo NR-Lite2 (Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah) para o saldo de radiação; sensor quântico, modelo LI-190SB (Li-cor, Nebraska, USA) para a radiação fotossinteticamente ativa; Pluviômetro, modelo

CS700-L (Hydrological Services, Liverpool, Australia) para a precipitação; anemômetro sônico, modelo 2D (Gill Instruments, Hampshire, UK) para velocidade e direção do vento; fluxo de calor no solo, modelo HFP01 (Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah); termistor e capacitor modelo HMP45 (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) para a temperatura e umidade relativa do ar. Trabalhou-se com frequência de leitura de dados de cinco segundos e registros de médias ou integrações em intervalos de 30 minutos.

Para mensurar a variabilidade temporal da umidade do solo, foram utilizadas os sensores Envirosmart (Sentek, SA, Austrália). Os tubos de acesso de ambos os equipamentos foram instalados a 1,8 m de profundidade e em posições de linha e entrelinha nos dois plantios. Foram feitas medidas em intervalos de 60 segundos e posterior média de meia hora para os dados temporais e média dos dados nas duas posições ao longo das parcelas.

Para avaliar o suprimento hídrico local, realizou-se o balanço hídrico climatológico, sendo o consumo de água calculado pelo modelo de Penman-Monteith (1965), que inclui os componentes aerodinâmicos e os do balanço de energia, em dados horários.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

em que:  $ET_0$ : evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $\Delta$ : declividade da curva de pressão de vapor na saturação ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $\gamma = 0,063 \text{ KPa}^\circ\text{C}^{-1}$  é a constante psicrométrica;  $R_n$ : radiação líquida ou saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $G$ : fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $U_2$ : velocidade do vento;  $T_{med}$  = temperatura média ( $^\circ\text{C}$ );  $e_s$  = pressão de vapor na saturação (kPa) e  $e_a$  = pressão de vapor atual (kPa).

Os balanços hídricos seqüenciais foram determinados pelo método de Thornthwaite e Matter, (1955) adaptado ao  $ET_0$ , com a capacidade de água disponível no solo (CAD), baseado nos valores do conteúdo de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente determinada por meio das curvas de retenção de água no solo. Desta forma, as CAD's foram de 130 mm e 103 mm para plantios adultos e jovens respectivamente em acordo com a profundidade da raiz.

Verifica-se que um período prolongado de déficit hídrico no período de agosto a dezembro. Durante a estação chuvosa é observado o pico de excedente hídrico a partir do mês de janeiro (Figura 2 a,b). Este comportamento é semelhante para ambos os plantios devido à proximidade das áreas e, portanto, menor variabilidade climática e do solo.

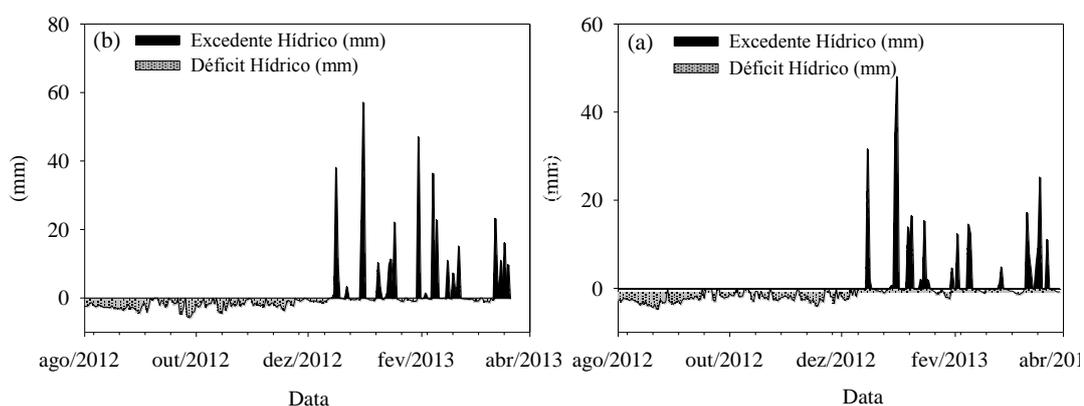


Figura 2. Extrato do balanço hídrico climatológico nos períodos das campanhas: (a) Jovem e (b) adulto.

O déficit de pressão de vapor (DPV) foi calculado pela diferença entre a pressão de vapor saturada e atual (Buck, 1981)

Buscando avaliar a resposta da planta à sazonalidade climática, foram realizadas campanhas de coleta de dados ecofisiológicos no período seco (08/2012), onde foi verificado intenso déficit hídrico, maiores valores de déficit de pressão de vapor e temperatura (Figura 3 a,b) e no período chuvoso (02/2013) com excedentes hídricos e menores valores da radiação fotossinteticamente ativa nos plantios adultos (Figura 3,c).

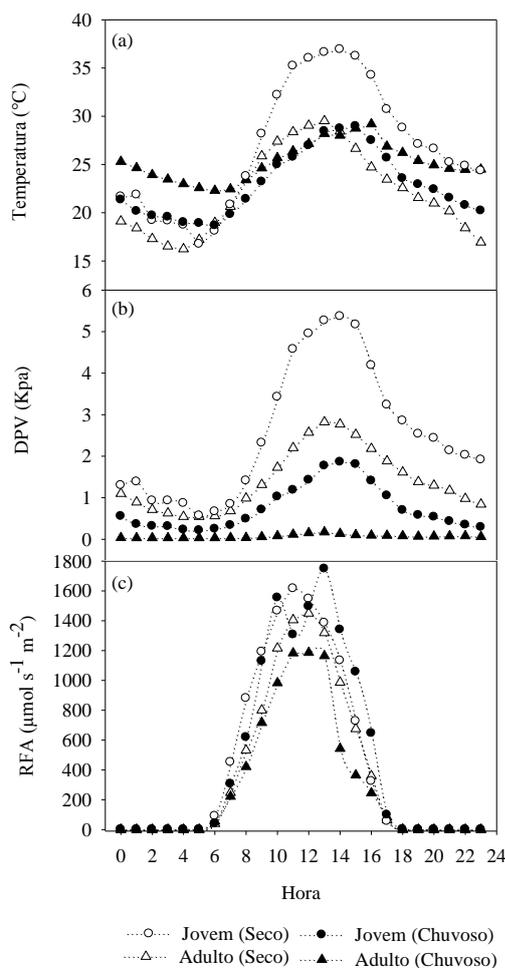


Figura 3. Curso horário da temperatura do ar (a), déficit de pressão de vapor (DPV) (b) e da radiação fotossinteticamente ativa (c) na estação seca e chuvosa em plantios jovens e adultos de eucalipto.

### 2.3. Medidas de biomassa, índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE)

Realizou-se o abate das árvores nos períodos das campanhas para expressar a incorporação de biomassa presente nos plantios jovem e adulto. Foram abatidas três árvores por parcela em cada talhão. Para esta análise, elegeram-se as árvores que apresentaram características médias, mínimas (árvores dominadas) e máximas (árvores dominantes) de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura, obtidos do inventário amostral dos talhões.

Foram obtidos separadamente os pesos frescos totais e das amostras para o tronco, galhos, casca, folhas, tronco e galhos. Em seguida, retiraram-se os discos dos galhos e do tronco a 65% da altura total e na altura do DAP. O material foi levado à estufa (65°C) para a obtenção do peso seco.

Para determinar a biomassa das raízes, foram abertas trincheiras a partir da escavação ao redor de cada árvore (3 m × 2 m e 1,8 m de profundidade) e posteriormente foram estratificadas por classes de diâmetro ( $\phi$ ) em raízes fina ( $\phi < 2$  mm), média ( $2 < \phi < 5$  mm) e grossa ( $\phi > 5$  mm) por peneiramento e catação manual. Foram obtidos pesos frescos e secos, conforme descrito anteriormente.

O IAF de cada árvore foi obtido conforme metodologia adotada por Dovey e du Toit (2006). Foi obtido o peso fresco total das folhas e das amostras coletadas em diferentes estratos do dossel. A área foliar foi medida utilizando o equipamento LI-3000 (Licor, Nebraska, USA). A razão da massa úmida e seca e a AFE foram calculadas e usadas para estimar o IAF de cada árvore amostrada.

Foram utilizadas as relações entre peso seco e a superfície das raízes para se obter a área de superfície radicular de raízes finas e médias, segundo metodologia adotada por Neves (2000).

#### 2.4. Medidas de fluxos e razão isotópica da respiração

A abundância natural do isótopo de  $^{13}\text{C}$  na notação do delta ( $\delta^{13}\text{C}$ ) foi expressa em partes por 1000 (‰) em relação ao padrão Pee Dee Belemnita (PDB), conforme a equação a seguir (Bernoux et al. 1998):

$$\delta^{13}\text{C} = \left( \frac{\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ amostra} - \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ padrão}}{\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ padrão}} \right) \times 1000 \quad (2)$$

O  $\delta^{13}\text{C}$  e a concentração do  $\text{CO}_2$  das amostras foram determinados pelo espectrômetro *Cavity Ring-Down* (CRDS) (Picarro Instruments, Sunnyvale, CA, EUA). As abundâncias do  $^{13}\text{C}$  e  $^{12}\text{C}$  são determinadas independentemente em duas linhas espectrais do comprimento de onda infravermelho. As medidas têm resoluções temporais máximas de 2 segundos. A sequência completa foi de cerca de 20 minutos por amostra na estação chuvosa e 40 minutos na seca.

Foram desenvolvidas câmaras coletoras pra trabalhar em conjunto com o CRDS permitindo a análise de gases (Figura 4). Mediram-se troncos em duas posições: a 1, 3 m do solo e em 65% da altura total da árvore e galhos, a partir de câmaras de polimetil-metacrilato (acrílico), espessura de 5 mm. Para as medidas dos galhos e do tronco na altura do DAP aos 10 meses, utilizou-se: altura (h) = 15,8 cm,

diâmetro interno ( $\phi_i$ )= 15,2 cm e volume ( $v$ )= 4,8 l. Na posição da altura do DAP no tronco adulto, as dimensões foram de:  $h = 26,7$  cm,  $\phi_i = 32,1$  cm e  $v = 1,23$  l. No plantio adulto em altura correspondente a 65% da altura total utilizou-se a câmara de  $h = 25,3$  cm,  $\phi_i = 20,1$  cm e  $v = 8,0$  l. Para maior homogeneização do ar foi adicionado um *cooler* interno. Cada câmara contou com um termopar para determinação da temperatura interna.

As raízes e folhas foram mensuradas *in situ*, sem que houvesse remoção ou corte. Utilizaram-se câmaras de PVC com septo acoplado e dimensões de  $h = 40$  cm,  $\phi_i = 4$  cm e  $v = 0,5$  l. A homogeneização do ar foi feito manualmente por meio de seringas. As raízes foram escavadas e posteriormente encubadas.

O efluxo de  $\text{CO}_2$  respirado pelo solo foi coletado utilizando câmaras LI-COR (LI-6400-09) de volume interno de  $991 \text{ cm}^3$ , e área circular de  $\phi=10$  cm e um sensor de temperatura do solo (20 cm de profundidade) acoplados ao analisador de gases infravermelho (Irga) portátil, modelo Li6400XT (Licor, Nebraska, USA). Para isto, foram instalados doze colares ( $\phi = 0,10$  m) por parcela alternados em linha, entrelinha e centro do espaçamento do plantio, sendo seis instalados na subparcela sem serrapilheira. As medidas foram tomadas nas cinco parcelas em horários entre 11:00 e 16:00 h.

Para a coleta  $\delta^{13}\text{C}$  do C respirado no solo e sistema solo+serrapilheira, foram desenvolvidas câmaras de PVC com dimensões de 50 x 100 cm visto que a câmara do Irga 6400XT não se adaptava ao sistema de coletas do CRDS.



Figura 4. Câmaras coletoras dos gases com medidas: no tronco na altura do DAP (a); galhos vivos (b) e tronco em 65% da altura total (c).

Foram realizados testes prévios com IRGA de alta frequência (Li7500, Licor, Nebraska) e resultados satisfatórios permitiram utilizar massa de modelar para a vedação das câmaras.

As medidas foram feitas nos componentes acima do solo: folhas, galhos, troncos (altura do DAP e 65% da altura total) e abaixo do solo: raiz, solo, solo + serrapilheira em três árvores por idade, nos horários entre 8:00 até 16:00h. Os dados foram monitorados no CRDS até fosse atingida a estabilização da razão isotópica do  $\delta^{13}\text{C}$ . Na época seca, somente foram coletadas na altura do DAP nos plantios jovens visto que as árvores apresentavam baixa estatura.

Os fluxos coletados nas câmaras foram derivados da taxa de acumulação do  $\text{CO}_2$  (Q) em função do tempo (t). O cálculo do fluxo é dado pela Equação (3). A declividade  $\Delta Q/\Delta t$  da razão de mistura do gás foi gerada utilizando um modelo de regressão linear.

$$f = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{PV}{RT} \frac{1}{A} \quad (3)$$

onde: f é o fluxo do gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) obtido pela respiração por órgão da planta, Q é a quantidade do  $\text{CO}_2$  na câmara no momento da amostragem, P é a pressão atmosférica (atm) na câmara, assumido ser igual a 1 atm, V é o volume da câmara (l), R a constante dos gases ideais ( $0,08205 \text{ atm L mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), T é a temperatura dentro da câmara no momento da amostragem (K) e A corresponde à superfície mensurada por unidade de área ou massa.

A razão isotópica e a concentração no  $\text{CO}_2$  no ecossistema, ou seja, na mistura do ar atmosférico e da biota do perfil do plantio, foi feita ao longo da torre em alturas correspondentes a distâncias exponenciais em relação ao solo (1, 2, 4, 16, 32 (copa) e 36 m) utilizando o conjunto de válvulas solenóides presentes no CRDS. Foram feitas réplicas de três dias contínuos em cada campanha.

Dispostos dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$ , e da concentração do  $\text{CO}_2$  respirado obtidos pelo CRDS, foi utilizado o modelo de mistura (equação 4) desenvolvido por Keeling (1958), chamada de reta “*Keeling*” que pode ser definida como uma equação linear derivada por meio de um balanço de massa pela qual é calculada a razão isotópica do  $\text{CO}_2$  respirado para o ecossistema.

Utilizou-se esta abordagem para determinar o  $\delta^{13}\text{C}$  do C respirado nos componentes autotróficos do sistema (folhas, galhos, raiz e troncos na altura do DAP e 65% da altura total).

Para os componentes solo e solo+serrapilheira, testes prévios indicaram a necessidade de um acúmulo maior de  $\text{CO}_2$  na câmara devido aos grandes ruídos

observados nas medidas de  $\delta^{13}\text{C}$  e a variação mínima observada nos dados de concentração do  $\text{CO}_2$ , devido às grandes dimensões da câmara e a alta sensibilidade do aparelho. Desta forma, não utilizou-se o *Keeling plot* para estes componentes, sendo a medida do  $\delta^{13}\text{C}$  obtida quando este se estabilizou na câmara.

Para verificar a relação das fontes de  $\delta^{13}\text{C}$  de cada órgão da planta com o  $\delta^{13}\text{C}$  da respiração do ambiente no plantio adulto, utilizou-se o software IsoSource (Phillips, 2001). O software consiste em distintas combinações dos  $\delta^{13}\text{C}$  dos órgãos das árvores para serem comparados com a assinatura da mistura ou respiração do ecossistema observado (equação 5). Se forem iguais ou dentro de uma pequena tolerância, essa combinação de proporções da fonte representa uma solução viável e é armazenado em um conjunto de dados.

$$\delta_M = f_A\delta_A + f_B\delta_B + f_C\delta_C \quad (5)$$

Medidas típicas de incremento para o  $\delta^{13}\text{C}$  estão entre 0,1 e 0,2% (Phillips e Gregg, 2003). Assim, utilizou-se a tolerância de 0,1% e o incremento de 1%.

Para determinar a razão isotópica dos tecidos vegetais, foram abatidas três árvores de mesmo diâmetro comparadas às árvores mensuradas ao redor da torre em cada plantio. Após coleta do material, levou-se a estufa ventilada (65°C). Posteriormente, os  $\delta^{13}\text{C}$  dos órgãos das plantas foram obtidos por análises em laboratório do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) /USP.

## 2.5. Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e comparados pelo teste de Tukey. Os efeitos dos fluxos foram considerados significantes ao nível de 5 % de probabilidade. Para a análise da razão isotópica dos órgãos, o nível de significância utilizado foi de 10 % de probabilidade, devido à maior variabilidade destas medidas. As médias foram apresentadas junto aos desvios padrões das amostras.

Foram utilizadas regressões lineares para gerar a reta *Keeling Plot*, utilizando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) ajustado entre os valores.

### 3. Resultados e Discussões

Verifica-se um crescimento 5,7 vezes maior do plantio jovem em relação ao adulto (Figura 5, ab), o que corresponde à um acréscimo de 80,4% da biomassa total entre os períodos seco e chuvoso comparados à 14,8% no adulto. Nesta idade, são observados maiores alocação de biomassa para as raízes, cascas e folhas. Nos plantios adultos, o lenho e a raiz foram os órgãos com maior incremento de biomassa.

Não existem diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) quanto à partição da biomassa entre os portes arbóreos. Observa-se, contudo, variações na biomassa total, com valores médios de  $162,2 \text{ T ha}^{-1}$  em árvores dominadas,  $180,0 \text{ T ha}^{-1}$  em árvores médias e  $183,7 \text{ T ha}^{-1}$  em dominantes no plantio adulto e  $25,8$ ,  $27,6$  e  $28,9 \text{ T ha}^{-1}$  para dominada, médias e dominantes nas árvores jovens na última coleta realizada.

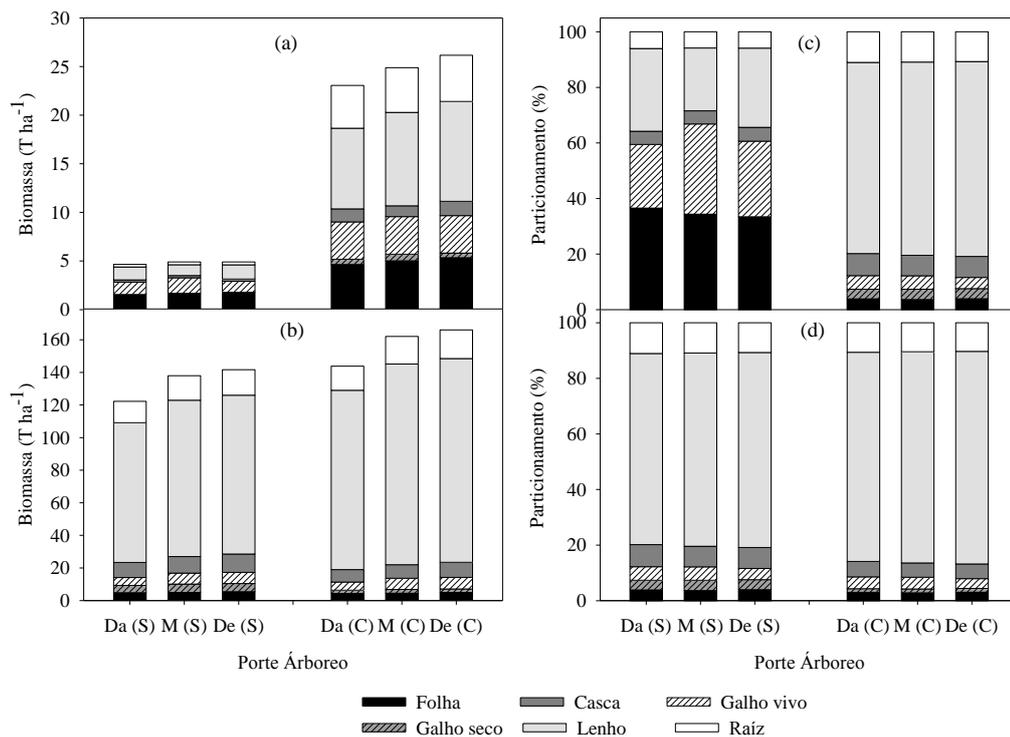


Figura 5. Biomassa e sua partição em porcentagem por órgão de árvores de eucalipto em diferentes portes arbóreos: dominada (Da), médios (M) e dominantes (De) nos plantios (a,c) Jovem e (b,d) Adulto para as estações climáticas seca (S), e chuvosa (C).

A Figura 6 apresenta os fluxos respiratórios dos órgãos das plantas jovens e adultas nas distintas estações climáticas. Observa-se que, por unidade de área (Figura 6a), o tronco é o órgão que mais respira seguido dos galhos, folhas e raízes. Esta

ordem se modifica quando se avalia os fluxos por unidade de massa (Figura 6b) em que a ordem decrescente de fluxos por órgão é: folha>tronco>galho>raiz.

Estes resultados são concordantes com os de Ryan et al. (2009) que observaram um decréscimo exponencial do fluxo respiratório de troncos e galhos por unidade de massa à medida que aumenta a idade em plantios de eucalipto no Havaí e sudeste brasileiro. A amplitude dos valores por massa do fluxo de tronco no Brasil encontrados por estes autores é subestimada ( $0,02 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) em relação aos resultados da idade adulta apresentados na Figura 6b ( $0,99 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ ), porém, ressalta-se que as medidas deste trabalho contemplam as alturas do DAP e em níveis superiores, onde os fluxos foram cerca de 11,5 vezes maiores.

Avaliando os efeitos do clima observa-se que em períodos chuvosos e mais quentes, os fluxos são maiores em todos os órgãos avaliados em relação ao período seco. Esta resposta é observada para as idades jovens e adultas avaliadas.

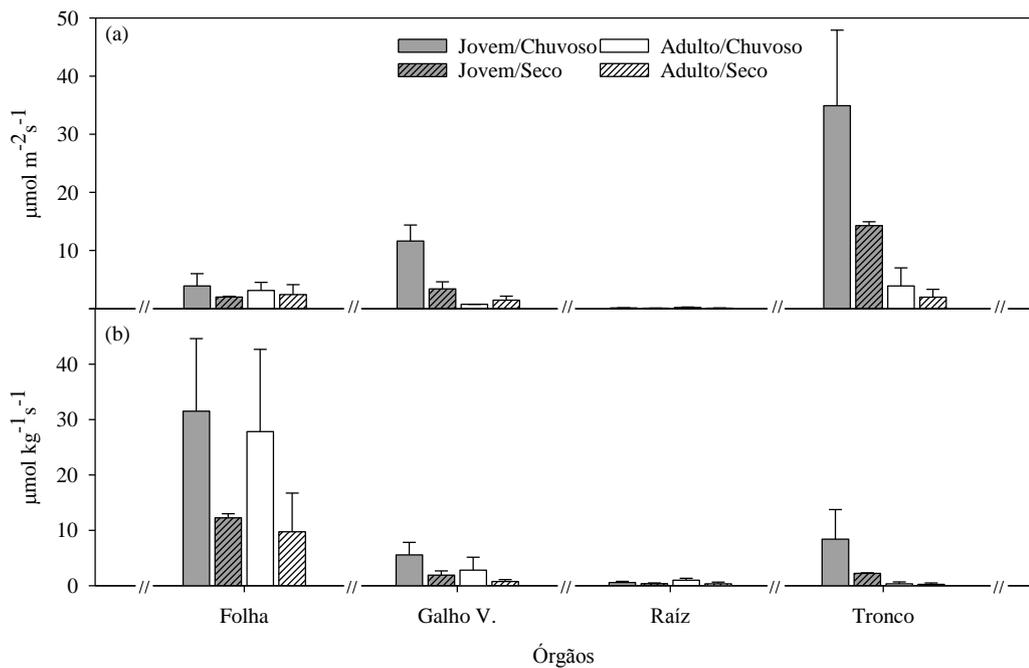


Figura 6. Valores da respiração por unidades de área (a) e de massa (b) nos diferentes órgãos de eucalipto para as idades jovem e adulta em estações chuvosa e seca.

Os efluxos do solo apresentaram um aumento significativo ( $p < 0,05$ ) nas áreas com a presença de serrapilheira em ambas as idades na estação chuvosa (Figura 7). Os microrganismos do solo aumentam a decomposição da matéria orgânica do solo (Zilli et al. 2003) com maior disponibilidade hídrica, somado a deposição de material vegetal senescente. Este resultado é também produto da respiração das raízes

(Reicosky e Lindstrom, 1993), que apresentaram um incremento de biomassa na estação chuvosa, sobretudo nos plantios jovens.

Maiores temperaturas do solo são encontradas nos plantios jovens, o que pode estar relacionado com a abertura do dossel e, portanto maior incidência de radiação solar e disponibilidade de energia na superfície do solo. A temperatura do solo apresenta influência nos efluxos respiratórios ( $R^2= 0,82$ ). Diversos estudos confirmam a boa relação entre estas variáveis (Longdoz et al. 2000; Zhang et al. 2013).

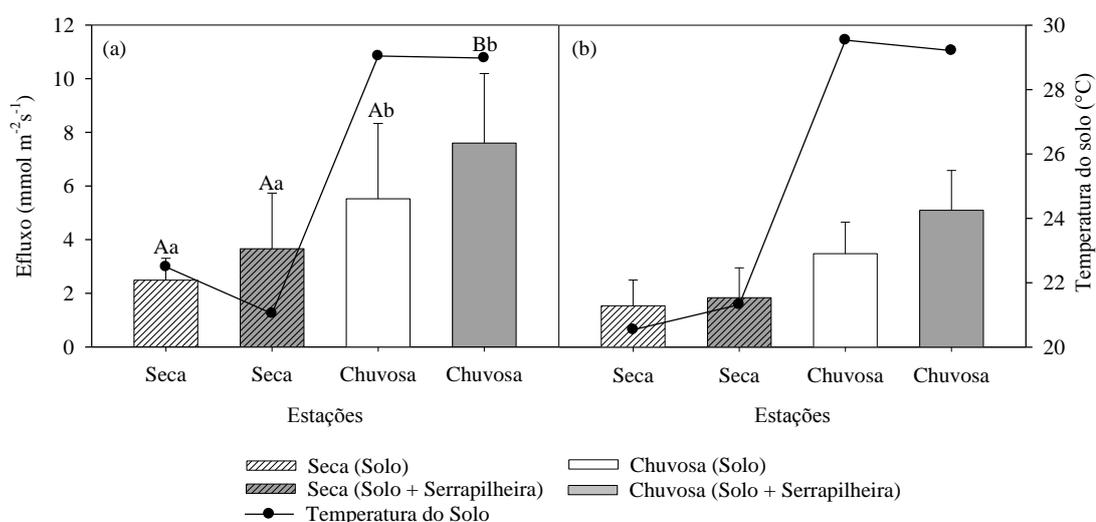


Figura 7. Efluxos respiratórios mensurados em solo com a presença e ausência da serrapilheira e temperatura a 20 cm de profundidade do solo nas estações secas (S) e chuvosas (C) dos plantios jovem (a) e adulto (b). Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de cada arranjo (presença ou não de serrapilheira), e minúscula dentro de cada estação climática, não diferem a 5 % pelo teste F.

Nas árvores jovens, os fluxos de CO<sub>2</sub> de cada partes medidos diferiram significativamente entre as estações climáticas (Figura 8). Diferente da árvore adulta que apresentou uma baixa variação no incremento de biomassa entre as estações, nas árvores jovens, estes valores e os fluxos unitários influenciaram decisivamente nos fluxos totais por árvore.

Analisando a variação dos fluxos entre os órgãos, verifica-se que a folha apresentou diferenças expressivas de fluxos em relação aos demais componentes, seguida pela raiz. Estes órgãos contribuem diretamente com o processo de trocas gasosas, visto que o aparato fotossintético encontra-se nas folhas e o sistema de aquisição de água e de nutrientes do solo, são representados pelas raízes,

especialmente por aquelas de menores diâmetros, as raízes finas e as médias (Neves, 2000). A respiração dos galhos e dos troncos não variaram significativamente em nenhum porte avaliado para estas idades.

A magnitude dos fluxos foliares do plantio jovem foi distinta do plantio adulto, com valores médios de  $157,5 \mu\text{mol árvore}^{-1} \text{s}^{-1}$  e  $128,5 \mu\text{mol árvore}^{-1} \text{s}^{-1}$  respectivamente. Apesar do particionamento da biomassa foliar ser maior em relação aos demais componentes na época seca, observa-se uma menor área foliar total com IAF de 2,1 nesta estação e de 5,3 na estação chuvosa. Maiores valores de AFE também são observados na estação chuvosa ( $9,5 \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ) em relação à seca ( $8,4 \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ). Com o desenvolvimento da planta, aumenta-se a área foliar e a massa seca das folhas (Benincasa, 2003), tendendo à queda dos valores dessa variável, conforme verificado na AFE da idade adulta.

O crescimento das plantas é variável e responsável pela atividade celular que induz a um aumento da respiração (Amthor, 2000, Cannell e Thornley, 2000). Considerando a grande taxa de crescimento observada nos plantios jovens, é razoável inferir que os fluxos respiratórios mensurados sejam predominantemente utilizados nos processos envolvendo o crescimento, onde se provém energia e esqueletos de carbono para a biossíntese dos componentes (Amthor, 2000). A respiração na idade adulta é provavelmente utilizada em uma proporção maior para a manutenção de processos metabólicos como substituição de proteínas, membranas e gradientes iônicos (Gifford, 2003) em relação à jovem.

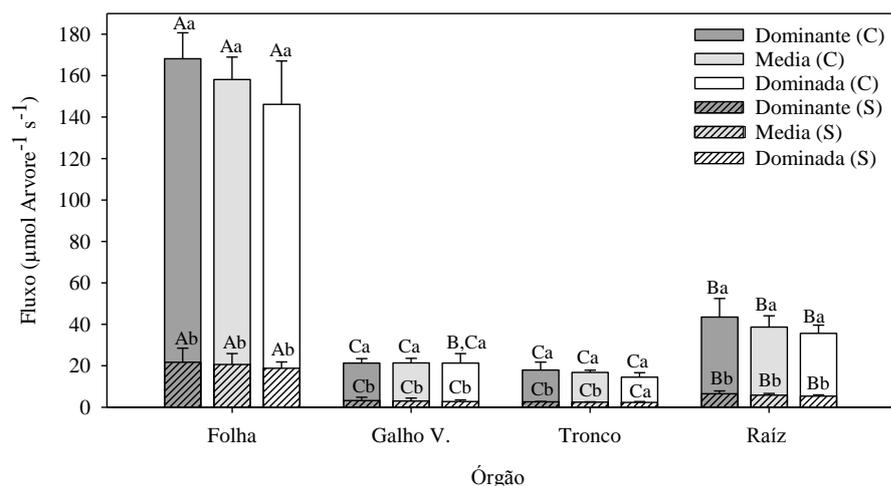


Figura 8. Fluxos respiratórios por árvore dos órgãos de distintos portes arbóreos de eucalipto (dominante, médio e dominado) em plantio jovem (10 e 17 meses) nas estação seca (S) e chuvosa (C). Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de cada órgão da planta, e minúscula dentro de cada tipo estação climática, não diferem a 5 % pelo teste F.

Verifica-se que os fluxos respiratórios dos órgãos das árvores de porte dominantes e médias são distintos entre as estações secas e chuvosas no plantio adulto (Figura 9), o que ocorre apenas nas folhas das árvores de portes dominadas. Observam-se medidas homogêneas com menores desvios padrões na época seca, resultando em menores fluxos e amplitude de variação dos valores devido à maior demanda evapotranspirativa do ambiente.

A folha é o componente que apresenta maiores médias dos valores de fluxo da respiração por árvore em relação aos demais, assim como no plantio jovem. Os menores fluxos estão entre a raiz e os galhos verdes, que, embora a primeira tenha apresentado maiores médias, não foram observadas diferenças estatísticas em nenhum dos portes arbóreos.

O maior valor observado de IAF na época chuvosa (4,5) em detrimento à época seca (3,8) tem relação com a variação do fluxo em escala de dossel, tendendo a incrementos com o aumento da superfície foliar. O AFE reduzido na época seca (6,3 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>) comparado à chuvosa (8,3 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>) pode ser indicativo de limitação do fluxo nesta época, devido a prováveis aumentos na espessura da folha (Ferreira, 1996) como um mecanismo de defesa contra a perda d'água na estação seca.

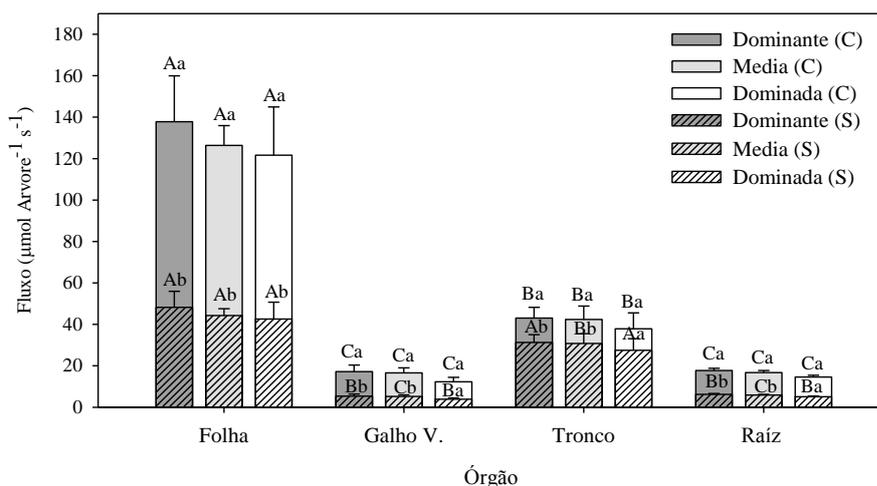


Figura 9. Fluxos respiratórios por árvore dos órgãos de distintos portes arbóreos de eucalipto (dominante, médio e dominado) em plantio adulto (58 - 65 meses) nas estações secas (S) e chuvosas (C). Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de cada órgão da planta, e minúscula dentro de cada tipo estação climática, não diferem a 5 % pelo teste F.

Os valores isotópicos do CO<sub>2</sub> respirado pelos órgãos, calculados pelo *Keeling Plot* (KP) dos órgãos nas idades jovens e adultas são apresentadas na estação seca (Figura 10) e chuvosa (Figura 11) e. Os resultados encontrados mostram que o KP pode ser aplicado em órgãos, visto que o método foi originalmente desenvolvido para determinar a  $\delta^{13}\text{C}$  do CO<sub>2</sub> em níveis de ecossistema. Damesin et al. (2005) também encontrou retas lineares utilizando câmaras em medidas de tronco em espécies de florestas nativas da França e Portugal. Adicionalmente, foram obtidas boas correlações ( $R^2 = 0,81$ ) entre o  $\delta^{13}\text{C}$  do método KP e as medidas diretas do CRDS, confirmando ser uma boa abordagem além de expressar os resultados integrados do  $\delta^{13}\text{C}$  respirado.

Na Figura 10, podem-se verificar de maneira geral, melhores correlações de  $\delta^{13}\text{C}$  nos períodos secos, comparados aos úmidos, com exceção dos galhos no plantio adulto. Esta resposta provavelmente resulta de uma menor variabilidade climática com menor aporte hídrico para a planta e uma condição mais homogênea ao longo do dia.

São observadas boas correlações entre os  $\delta^{13}\text{C}$  do CO<sub>2</sub> respirado e os valores do inverso da concentração do CO<sub>2</sub> nos órgãos das árvores dos dados coletados na estação chuvosa (Figura 11), sendo que o melhor ajuste ocorre nas folhas jovens ( $R^2 = 0,98$ ).

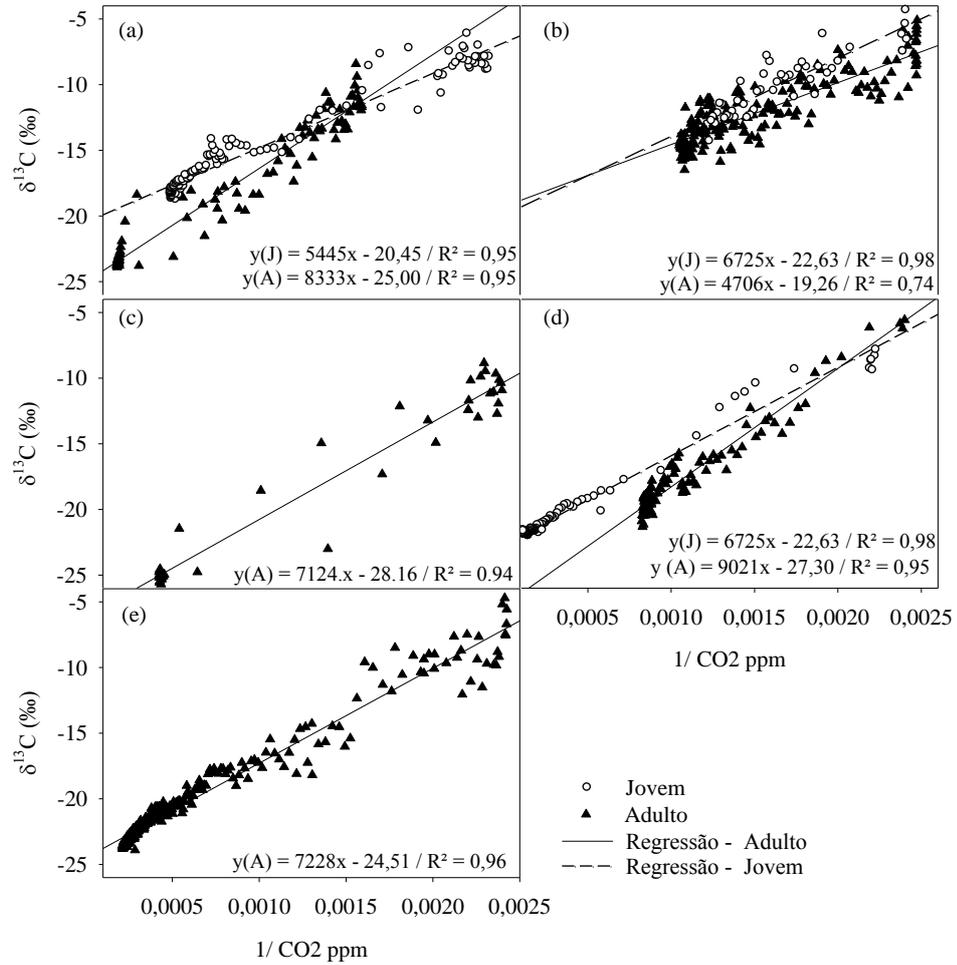


Figura 10. Amostra de uma árvore medida pelo método *Keeling plot* apresentando a dispersão linear dos valores de razão isotópica da respiração das folhas (a), galhos (b), Raiz (c) Tronco - altura do DAP (d) e tronco - 65% da altura total e dados do inverso da concentração de CO<sub>2</sub> medidos em plantios jovens e adultos na estação seca.

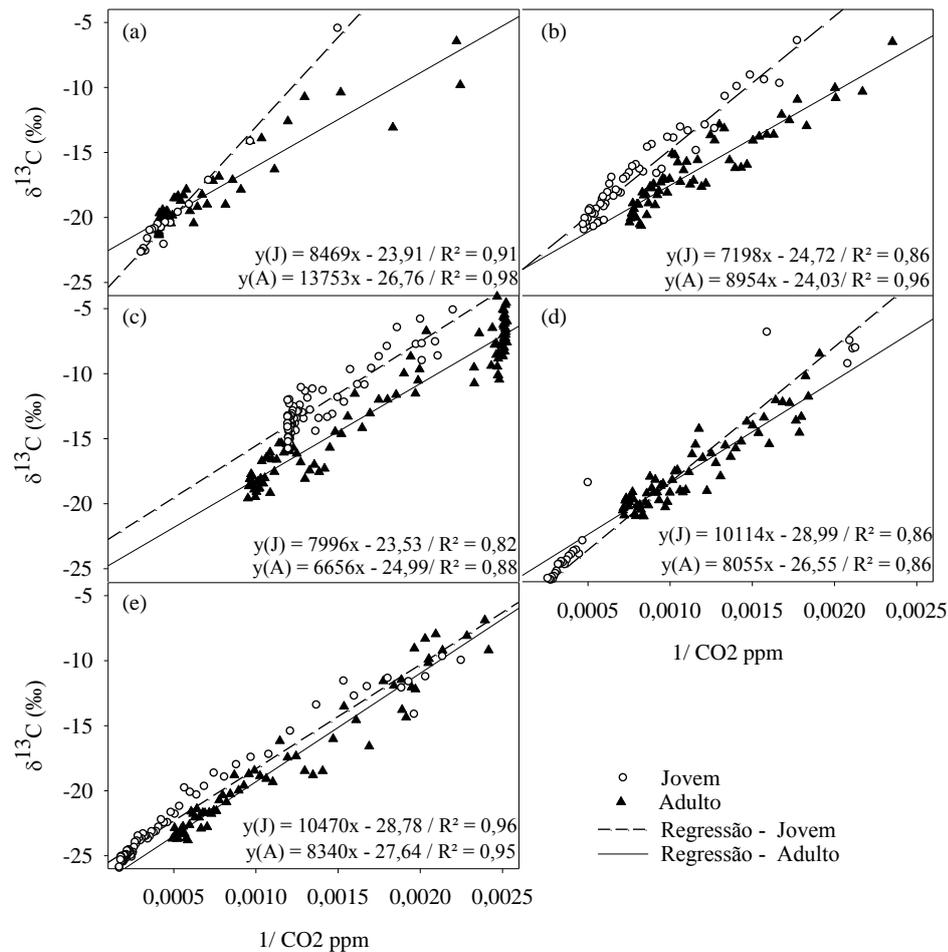


Figura 11. Amostra de uma árvore medida pelo método *Keeling plot* apresentando a dispersão linear dos valores de razão isotópica da respiração das folhas (a), galhos (b), Raiz (c) Tronco - altura do DAP (d) e tronco - 65% da altura total (e) e dados do inverso da concentração de CO<sub>2</sub> medidos em plantios jovens e adultos na estação chuvosa.

Analisando o  $\delta^{13}\text{C}$  da respiração por idades (Figura 12a), verifica-se não existir diferenças estatísticas entre nenhum dos órgãos avaliados nos plantio jovem e adulto na estação chuvosa, o que difere na estação seca, para as folhas e os galhos. É observado um ligeiro empobrecimento médio (-22,7 ‰) na idade adulta comparada à jovem (-21,0 ‰).

Os valores do  $\delta^{13}\text{C}$  dos tecidos dos órgãos das plantas (Figura 12b) tiveram comportamento semelhante ao obtido pelos fluxos respiratórios, quando se analisa a resposta entre as idades. Os  $\delta^{13}\text{C}$  avaliados não diferiram significativamente no período chuvoso e com exceção das raízes, os demais órgãos apresentaram diferenças entre as idades na estação seca. As raízes e os troncos foram mais

empobrecidos na idade adulta, assim como verificado nos  $\delta^{13}\text{C}$  dos fluxos respiratórios e, diferentemente, das folhas e galhos mais jovens.

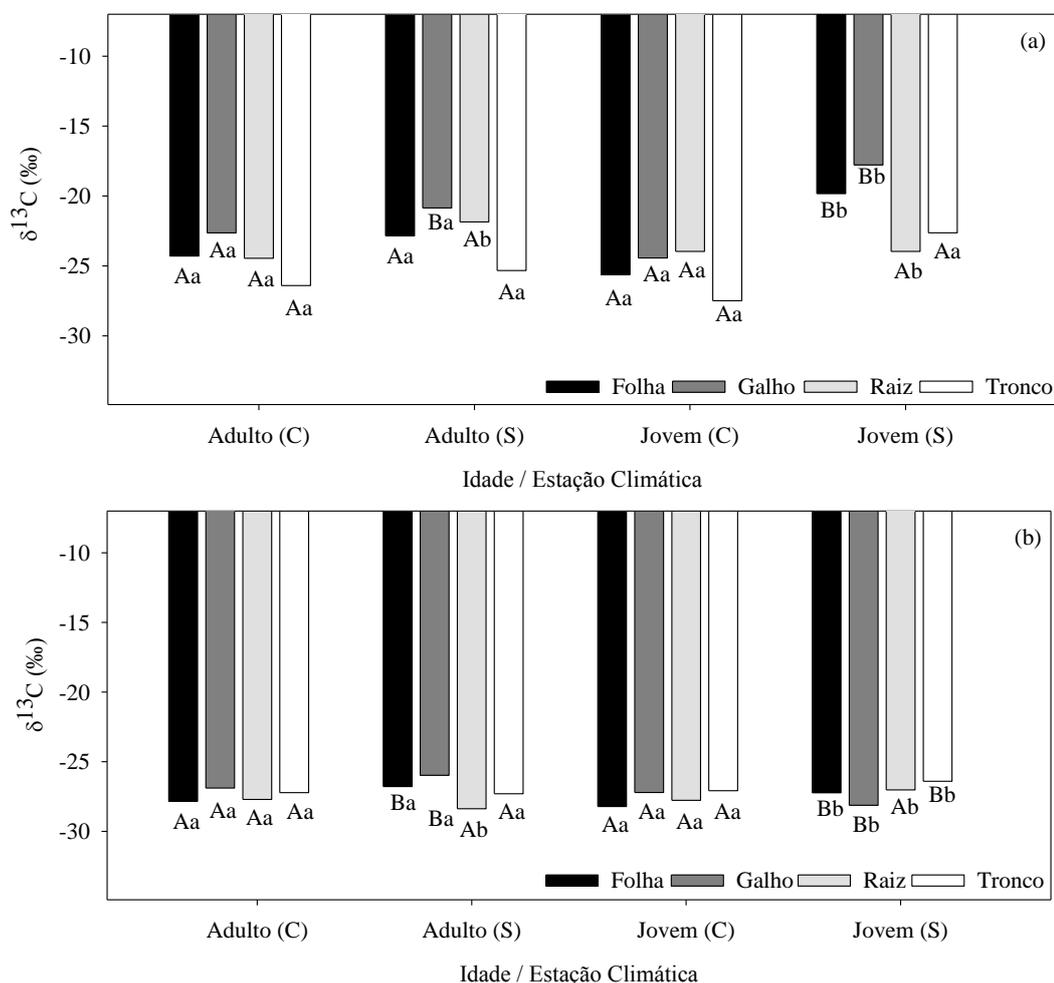


Figura 12. Valores da razão isotópica do  $\delta^{13}\text{C}$  da respiração dos órgãos (a) e da razão isotópica do  $\delta^{13}\text{C}$  das massas dos tecidos (b) de árvores médias de plantios jovens e adultos de eucalipto entre as estações chuvosas (C) e secas (S). Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de cada idade da planta e minúscula dentro de cada estação climática, não diferem a 10 % pelo teste F.

O plantio jovem foi aquele com maiores distinções entre as estações climáticas avaliadas, sendo as folhas, galhos e a raízes menos enriquecidas significativamente, com valores mais negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  provindos do fluxo respiratório na estação chuvosa. O mesmo resultado observado para os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  dos tecidos da folha, raízes e tronco. Esta discriminação isotópica é relatada pelas trocas gasosas geradas no processo de fotossíntese e determinado em partes pela razão da concentração interna de  $\text{CO}_2$  no mesófilo foliar em relação à concentração ambiente (ci/ca) (Farquar et al. 1982, Farquhar et al. 1989). A relação

ci/ca nesta idade apresentou-se ligeiramente superior na estação chuvosa, embora a diferença entre elas tenha sido muito pequena (0,07), indicando que, apesar do severo déficit hídrico que estas plantas estiveram submetidas, o efeito foi maior devido aos altos incrementos de biomassa e portanto, uma maior atividade metabólica.

Comparando o resultado gerado pela sazonalidade climática no  $\delta^{13}\text{C}$  dos fluxos respiratórios, observa-se que no plantio adulto, todos os órgãos apresentaram maiores discriminações de fluxo respirado na estação chuvosa, embora somente a raiz tenha sido estatisticamente diferente (Figura 12a). Nos tecidos, as raízes também foram as únicas que se apresentaram estatisticamente diferente entre as estações, embora as folhas e os galhos tenham médias mais negativas em período de maior oferta hídrica. O maior valor de ci/ca no plantio adulto na seca (1,04) comparado ao período chuvoso (0,69) encontrado por Rody et al. (2013) nestes mesmos sítios e épocas de medidas indicam que a Rubisco tende a discriminar menos o  $^{13}\text{C}$  no processo de fotossíntese na estação seca.

Em geral, os dados de  $\delta^{13}\text{C}$  dos fluxos de  $\text{CO}_2$  respirado apresentam-se mais enriquecidos do que os valores correspondentes ao  $\delta^{13}\text{C}$  da massa de tecido (Figura 13). Para folhas, galhos e troncos, o plantio jovem na estação seca foi o que apresentou a maior variação entre as amostras, seguido do plantio adulto, também na época seca.

O balanço líquido do  $\delta^{13}\text{C}$  devido aos efeitos da respiração nos produtos da biossíntese, ora se encontram com resultados de empobrecimento ora de enriquecimento isotópicos. Porém, é generalizado que, embora o mecanismo de fracionamento durante a respiração não seja compreendido em sua totalidade, nas folhas, o  $\delta^{13}\text{C}$  da respiração é enriquecido comparado à massa de tecido foliar e varia com o tipo de substrato (Tcherkez et al.,2003). Merchant et al. (2011) encontrou variações nos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de componentes como a sacarose e a rafinose apresentaram um enriquecimento significativo comparado ao  $\delta^{13}\text{C}$  da massa de tecido foliar em *E. globulus* de 5 meses de idade.

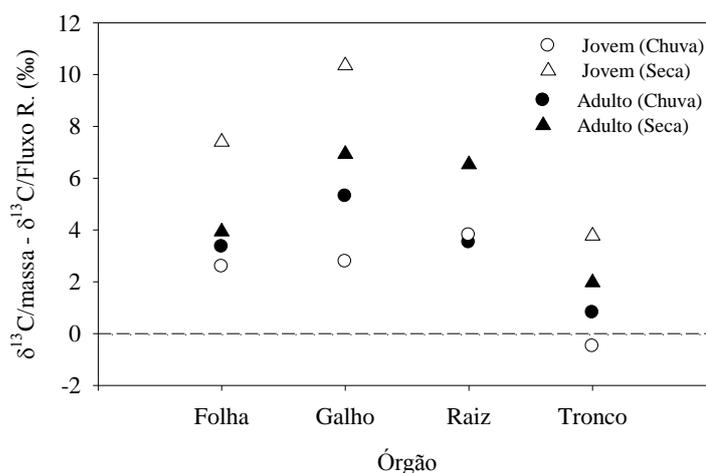


Figura 13. Comparação entre a composição isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) do  $\text{CO}_2$  na massa dos órgãos subtraído da razão isotópica do  $\delta^{13}\text{C}$  de fluxo de respiração (R) do mesmo órgão como indicativo de enriquecimento/empobrecimento destes componentes nos plantios jovens e adultos de eucalipto nas estações chuvosa e seca.

As medidas do conteúdo de água no solo (Figura 14) corroboram com a hipótese de haver um maior empobrecimento isotópico no período chuvoso ( $\delta^{13}\text{C} = -23,7\text{‰}$ ) em relação ao seco ( $\delta^{13}\text{C} = -22,1\text{‰}$ ) na respiração do ecossistema adulto do eucalipto (Figura 15). Mcdowell et al (2004) encontrou que o  $\delta^{13}\text{C}$  do  $\text{CO}_2$  respirado pelas florestas plantadas de Douglas-fir e Pinus nos Estados Unidos foram mais empobrecidos para maiores armazenamentos de água no solo. Esta relação também parece ser bem estabelecida nos trabalhos de Bowling et al. (2002) e de Pataki et al. (2003).

A maior discriminação isotópica no período parece ter influência do déficit de pressão de vapor (DPV) ao longo do ano. A relação direta de um maior enriquecimento e maior DPV foi observada em ambos os plantios com valores médios de 2,4 Kpa para períodos secos e 1,0 Kpa naqueles mais úmidos, indicando que uma maior demanda atmosfera por vapor d'água tende a influenciar na redução do influxo do  $\text{CO}_2$  para folha, que ocorre por processos de difusão. Esta relação foi também verificada para plantios de Douglas-fir no noroeste dos Estados Unidos (Mcdowell et al. 2004). Estes mesmos autores não encontraram esta relação para florestas de Pinus.

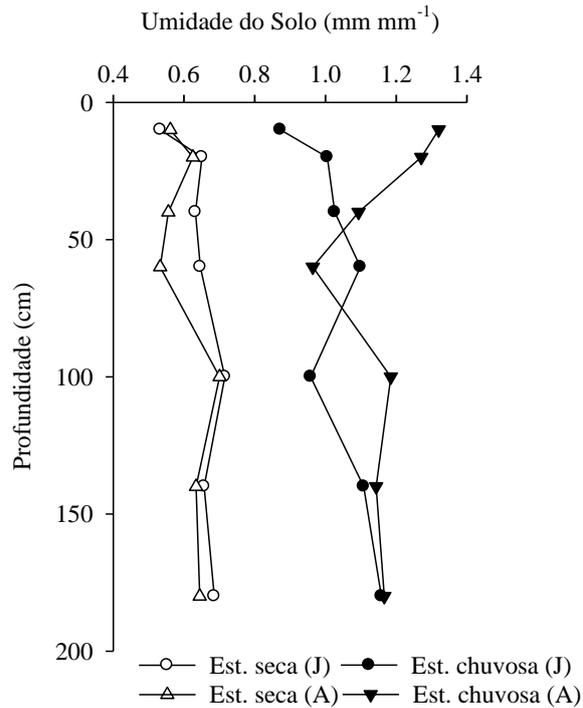


Figura 14. Conteúdo de água em diferentes profundidades do solo nas estações seca e chuvosa nos plantios jovens (J) e adultos (A) de eucalipto.

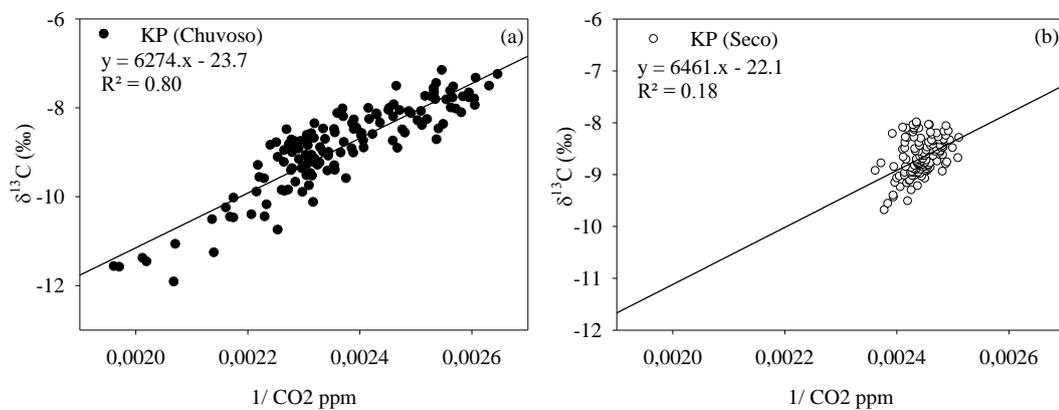


Figura 15. Keeling Plot da respiração do plantio de eucalipto adulto em épocas chuvosas (a) e secas (b)

A Figura 16 apresenta os valores da concentração de  $\text{CO}_2$  e do  $\delta^{13}\text{C}$  da respiração do ecossistema no plantio adulto em diferentes alturas a partir do nível do solo.

É observada uma maior variabilidade dos fluxos de  $\text{CO}_2$  ao longo do dia na estação chuvosa e certa homogeneidade dos fluxos na estação seca. Este comportamento advém da interação de variáveis físico-climáticas e do metabolismo biológico como a respiração de componentes autotróficos e heterotróficos do

ecossistema. As menores amplitudes diárias e maiores médias noturnas da velocidade do vento durante a estação seca contribuíram com a dispersão do CO<sub>2</sub>, diminuindo a diferença dos valores da concentração do CO<sub>2</sub> em níveis acima e abaixo do dossel (Figura 17).

Durante a noite, é verificada certa estabilidade das medidas da concentração de CO<sub>2</sub>, resultante da diminuição do transporte vertical do vento ocasionado, sobretudo pelo resfriamento da superfície. Desta forma, o CO<sub>2</sub> tende a se mover por outros tipos de transporte como o escoamento e a advecção (Goulden et al. 2006).

É observada uma resposta semelhante da variação da concentração do CO<sub>2</sub> ao longo dos dias mais úmidos na altura de 16 m. Os valores de CO<sub>2</sub> tendem a se acumular ao longo da noite, sobretudo nos níveis próximos ao solo, devido a tendência à baixa turbulência do vento o que explica o aumento progressivo nas primeiras horas da noite e maiores valores de CO<sub>2</sub> próximo às 4:00 h da manhã. A partir das 8:00 h, onde os processos mecânicos são maiores devido ao aquecimento da superfície pela radiação solar, ocorre um decréscimo pronunciado da concentração do CO<sub>2</sub> em níveis abaixo da copa (Figura 17, a,b,c,d,e) até atingir os valores mínimos próximos as 12:00 h. Este padrão de resposta do escoamento do CO<sub>2</sub> também foi observado por Freitas (2012) em florestas Atlânticas em São Paulo.

No nível do dossel e na camada superior próxima a ele (Figura 17 f,g), a resposta aos processos fotossintéticos é mais rápida, indicando a maior absorção do CO<sub>2</sub> nas primeiras horas do dia e posteriormente uma redução em função da alta demanda atmosférica que geralmente é observada nas horas mais quentes do dia. Verifica-se que na estação chuvosa ocorre menor concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do dia, devido à maior absorção deste em processos fotossintéticos, conforme observado por Rody et al. (2013) com valores médios diários de fotossíntese líquida de 1,2 e 6,6  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  na estação seca e chuvosa respectivamente para este mesmo sítio experimental.

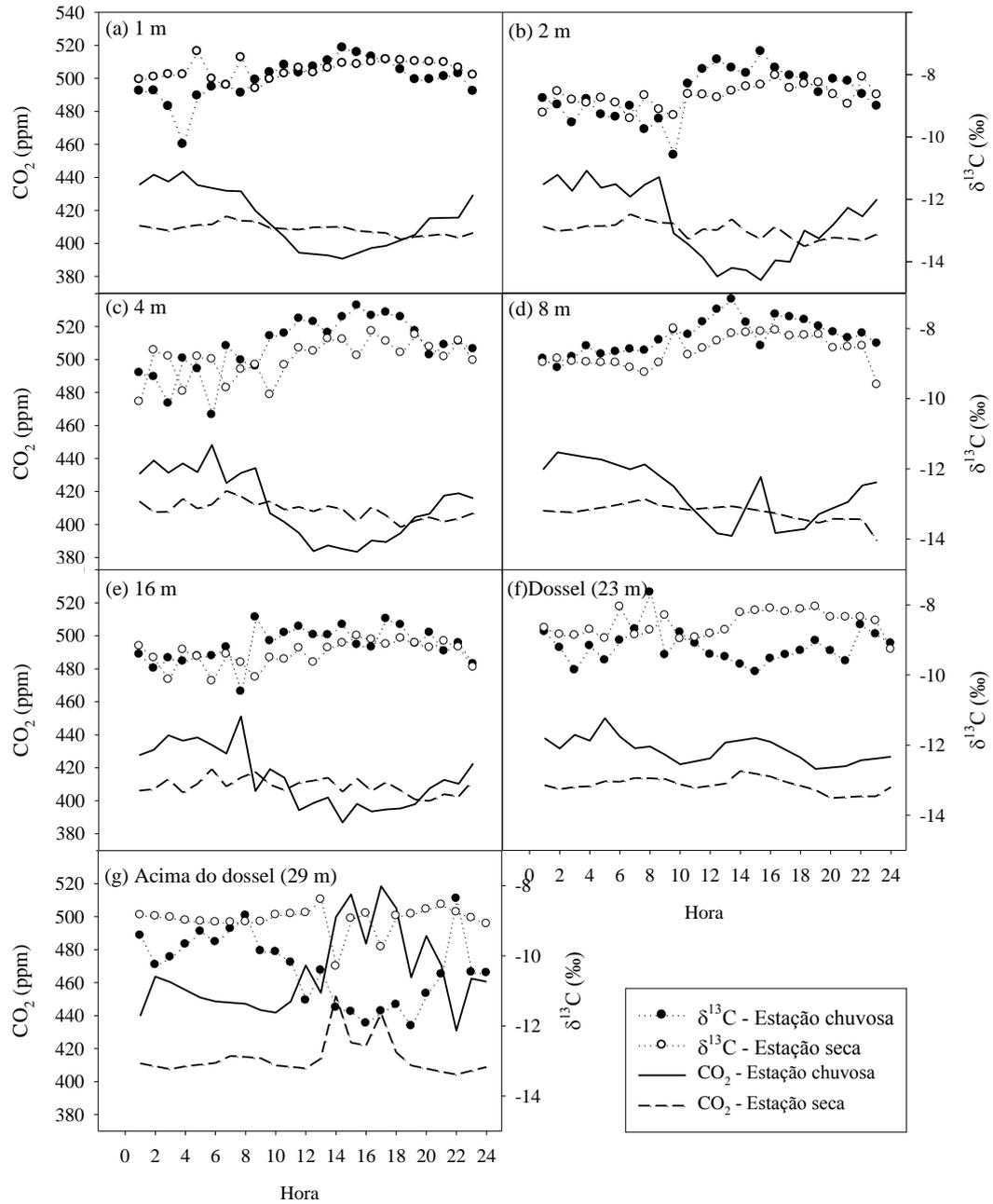


Figura 16. Valores de CO<sub>2</sub> e da mistura do δ<sup>13</sup>C da respiração da biota e do ar atmosférico no plantio adulto em alturas a partir do nível do solo de: 1 m (a), 2 m (b), 4 m (c), 8 m (d), 16 m (e), 23 m – altura do dossel foliar (f) e 29 m – correspondente a 4 m acima do dossel (g).

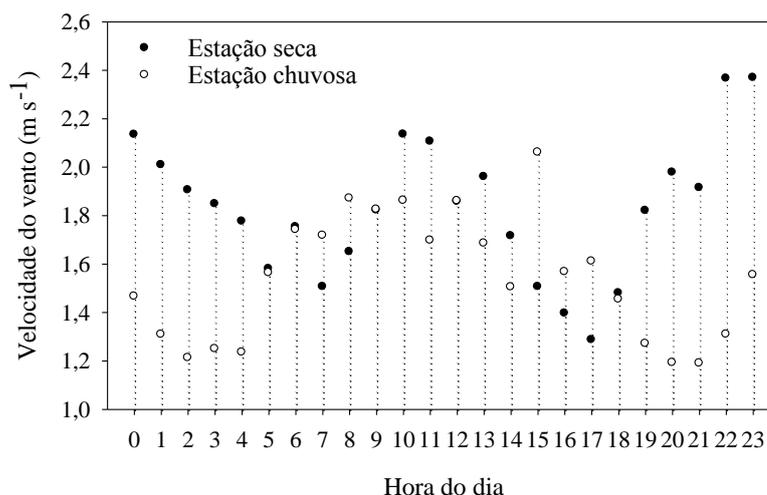


Figura 17. Velocidade do vento médio horário nas estações secas e chuvosas.

Ainda na Figura 16, observa-se que os valores do  $\delta^{13}\text{C}$  da respiração do ecossistema pouco se diferenciaram entre as estações estação seca e chuvosa nas alturas abaixo do dossel.

As observações dos valores do  $\delta^{13}\text{C}$  ao longo do dia permitem inferir que a respiração do ecossistema possui influência de diferentes fontes à medida que se analisa as alturas. As medidas nas menores alturas indicam uma interação maior da respiração do solo e seus componentes autotróficos e heterotróficos.

São observados maiores enriquecimentos do  $\delta^{13}\text{C}$  no ar próximo ao solo, sendo que nos horários mais quentes do dia (entre 12 e 15 h), isto se evidencia. Grossiord et al. (2012) avaliaram o curso diário do  $\delta^{13}\text{C}$  do solo em áreas de plantio de *Eucalyptus* no Congo e trabalharam com a hipótese que nesta mesma faixa horária, parte do fluxo interno de  $\text{CO}_2$  produzido pela respiração autotrófica é desviado para processos respiratórios na seiva do xilema e este valor é em torno de 24% do  $\text{CO}_2$  do efluxo da raiz. Aubrey e Teskey (2009) seguindo esta hipótese, encontraram que o influxo para o xilema corresponde ao dobro da respiração da raiz.

Nos níveis da copa, de uma maneira geral os valores de razão isotópica do carbono respirado apresentam-se mais empobrecidos na estação chuvosa, sendo que durante o dia, o solo é provavelmente o que exerce a maior contribuição para o valor de  $\delta^{13}\text{C}$  do ambiente e durante a noite, a respiração noturna foliar. Este resultado é ainda mais pronunciado a partir de 4 m acima da copa.

A contribuição dos indivíduos autotróficos e heterotróficos particionada gerada a partir dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de cada componente é apresentada na Figura 18,

indicando que os componentes abaixo do solo contribuem com cerca de 48,3% da respiração total do ecossistema. Destes, é observado que 40,3% correspondem à respiração da raiz. Epron et al. (2009) citam que a contribuição das fontes autotróficas no fluxo do solo possuem valores variáveis em uma escala de 20 a 80%.

A razão isotópica do  $\delta^{13}\text{C}$  empobrecido dos solos (-20,5‰) reflete a incorporação da matéria orgânica do eucalipto ao longo dos 48 meses de plantio comparadas uso anterior. Esta resposta é evidenciada ainda quando se avaliou a influência da serrapilheira no solo em que os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  foram ainda mais empobrecidos (-23,1‰).

Dos órgãos avaliados, a folha apresentou maior contribuição para os fluxos respiratórios totais do ecossistema do eucalipto. Este resultado é concordante com os dados de fluxo total/ árvore mostrados anteriormente.

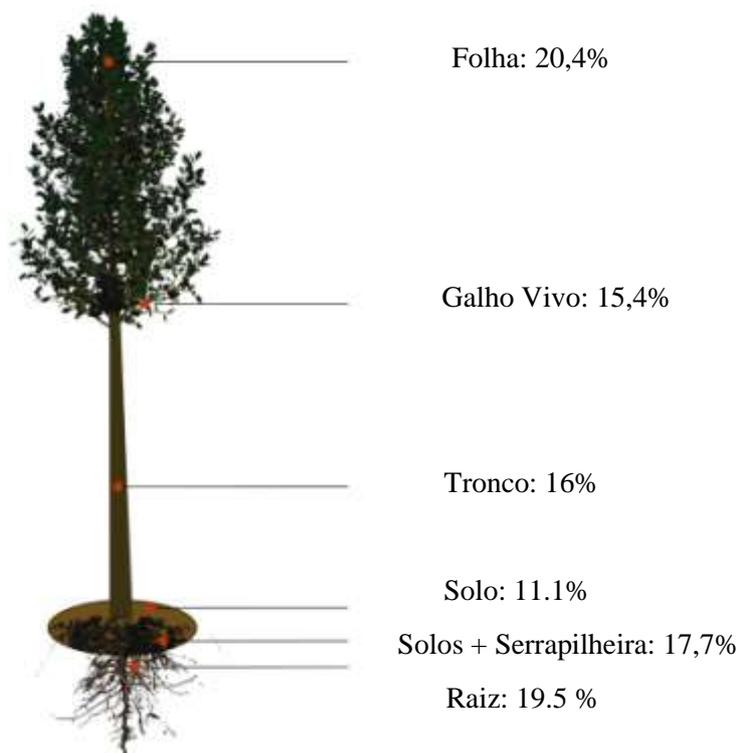


Figura 18. Percentual de contribuição dos diferentes componentes do ecossistema em níveis abaixo e acima do solo em ecossistemas de eucalipto.

#### 4. Conclusões

Maiores fluxos são verificados na estação chuvosa nos componentes da parte aérea (tronco, folhas, galhos vivos) e do solo (raiz, solo com ausência e presença de serrapilheira), onde se tem maiores incrementos de biomassa, IAF e AFE.

Os fluxos respiratórios do plantio jovem apresentaram-se em geral maiores nas folhas e raízes e reduzidos nos troncos, quando comparados à idade adulta, sendo que para ambas idades, a folha foi o órgão com maior respiração em relação aos demais.

O  $\delta^{13}\text{C}$  da respiração foi mais enriquecido quando as árvores encontravam-se em condição de estresses hídricos em períodos de estiagem.

Os componentes da parte aérea foram aqueles com maior contribuição no ecossistema florestal (57,7%), comparados aos componentes abaixo do solo, sendo a raiz, a maior contribuidora.

#### 5. Referências Bibliográficas

Aber, J. D.; Reich P. B. Goulde M. L. Extrapolating leaf CO<sub>2</sub> exchange to the canopy: A generalized model of forest photosynthesis validated by eddy correlation. *Oecologia*, v. 106, n. 2, p. 257-265, 1995.

Amthor, J. S. The McCree-de Wit-Penning de Vries-Thornley respiration paradigms: 30 years later. *Annals of Botany*, v.86, p. 1–20,2000.

Aubrey, D. P; Teskey, R. O. Root-derived CO<sub>2</sub> efflux via xylem stream rivals soil CO<sub>2</sub> efflux. *New Phytologist*, v. 184, p. 35–40, 2009.

Badeck F.W., Tcherkez G., Nogués S., Piel C., Ghashghaie J. Post-photosynthetic fractionation of stable carbon isotopes between plant organs—a widespread phenomenon. *Rapid Commun. Mass Spectrom*, v. 19, p. 1381–1391, 2005.

Benincasa, M. M. P. *Análise de crescimento de plantas:Noções básicas*. 2ª ed., Funep, Jaboticabal, Brasil. 2003, 41p.

Bernoux, M.; Cerri, C. C.; Neill, C.; Moraes, J. F. L.The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates.*Geoderma*, v. 82, p. 43-58, 1998.

Bowling DR, McDowell NG, Bond BJ, Law BE, Ehleringer JR. 13C content of ecosystem respiration is linked to precipitation and vapor pressure deficit. *Oecologia*, v.131, p. 113–124, 2002.

Bowling, D. R; Pataki, D. E. Randerson J Carbon isotopes in terrestrial ecosystem pools and CO<sub>2</sub> fluxes (Tansley Review), *New Phytologist*, v. 178, p. 24-40, 2008.

Cannell, M. G. R; Thornley, J. H. M. Modelling the components of plant respiration: some guiding principles. *Annals of Botany*, v.85, p. 45–54, 2000.

Ciais, P. et al. Partitioning of ocean and land uptake of CO<sub>2</sub> as inferred by d<sup>13</sup>C measurements from the NOAA Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory global air sampling network. *Journal Geophys.Res.*, v.100, p. 5051-5070, 1995.

Damesin, C., Barbaroux, C., Berveiller, D., Lelarge, C., Chaves, M., Maguas, C., Maia, R., Pontailier, J.Y. The carbon isotope composition of CO<sub>2</sub> respired by trunks: comparison of four sampling methods. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, v. 19,369-374. 2005.

Dovey, S.B.; Du Toit, B. Calibration of LAI-2000 canopy analyser with leaf area index in a young eucalypt stand. *Trees*, v.20, p. 273–277, 2006.

Duranceau M, Ghashghaie J, Badeck F, Deleens E, Cornic G. δ<sup>13</sup>C of CO<sub>2</sub> respired in the dark in relation to δ<sup>13</sup>C of leaf carbohydrates in *Phaseolus vulgaris* L. under progressive drought. *Plant, Cell & Environment.*, v. 22, p. 515–523, 1999.

Epron D, Marsden C, Thongo M’Bou A, Saint-Andre’ L, d’Annunzio R, Nouvellon Y. Soil carbon dynamics following afforestation of a tropical savannah with Eucalyptus in Congo. *Plant and Soil*, v. 323, p. 309–322, 2009.

Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v.40, p. 503–537, 1989.

Farquhar GD, O’Leary MH, Berry JA. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intracellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, v.9, p. 121–137, 1982.

Fibria. Monitoramento de Flora e Fauna. Relatório interno. 88p. 2011.

Foyer, C. H., Noctor, G., and Verrier, P. Photosynthetic carbon-nitrogen interactions: Modelling inter-pathway control and signalling, In: *Control of Primary Metabolism in Plants*. pp. 325–34x. Plaxton, W. C. and McManus, M. T., Eds., *Annual Plant Reviews*, Blackwell Publishing, Oxford. v. 22, 2006.

Freitas, H. C. A. *Influência dos transportes advectivos na estimativa do balanço de CO<sub>2</sub> do ecossistema: um estudo de caso para a mata atlântica com uso de técnicas micrometeorológicas*. Tese. 94 f. 2012. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

Giardina, C. P.; Ryan, M. G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, v. 404, p. 858–861, 2000.

Gifford RM. Plant respiration in productivity models: conceptualisation, representation, and issues for global terrestrial carbon cycle research. *Functional Plant Biology*, v. 30, p. 171–186, 2003.

Gillon, J. S.; Griffiths, H. The influence of (photo)respiration on carbon isotope discrimination in plants. *Plant Cell Environ*, v. 20, p. 1217–1230, 1997.

Goulden, M. L.; Miller, S. D.; D. A.; Rocha, H. R. Nocturnal cold air drainage and pooling in a tropical forest. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, New York, v. 11, p. 234-267, 2006.

Griffis, T. J. Tracing the flow of carbon dioxide and water vapor between the biosphere and atmosphere: A review of optical isotope techniques and their application. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 174, p. 85– 109, 2013.

Grossiord, C.; Mareschal, L.; Epron D. Transpiration alters the contribution of autotrophic and heterotrophic components of soil CO<sub>2</sub> efflux. *New Phytologist*, v. 194, n. 3, p. 647-653, 2012.

Ippc. Climate change: the scientific basis. *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA), pp. 105–118. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 2001.

Ippc. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds) Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, 976 p. 2007.

Janssens IA, Lankreijer H, Matteucci G, Kowalski AS, Buchmann N, Epron D, Pilegaard K, Kutsch W, Longdoz B, Grunveld T et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, v. 7, p. 269–278, 2001.

Keeling, C. D., The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas, *Geochim Cosmochim Acta*, v. 13, p. 322 – 334, 1958.

Kira, T. and T. Shidei. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. *Jpn. J. Ecol.*, v. 17, p. 70-87, 1967.

Litton, C. M.; J.W. Raich and M.G. Ryan. Carbon allocation in forest ecosystems. *Glob. Change Biol.*, v. 13, p. 2089–2109, 2007.

Longdoz, B., Yernaux, M., Aubinet, M. Soil CO<sub>2</sub> efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biol.*, v. 6, p. 907–917, 2000.

McDowell, N. G. , D. R.; Bowling, A.; Schauer, J.; Irvine, B. J.; Bond, B. Law E.; Ehleringer J. R. Associations between carbon isotope ratios of ecosystem respiration,

water availability and canopy conductance . *Global Change Biology*, v. 10, p. 1767-1784, 2004.

Merchant, A.; wild, B.; Richter, A.; Bellot, S.; Adams, M. A.; Dreyer, E. Compound-specific differences in  $^{13}\text{C}$  of soluble carbohydrates in leaves and phloem of 6-month-old *Eucalyptus globulus* (Labill). *Plant, Cell and Environment*, v.34, p. 1599–1608, 2011.

Ogee J, Peylin P, Ciais P, Bariac T, Brunet Y, Berbigier P, Roche C, Richard P, Bardoux G, Bonnefond J-M. Partitioning net ecosystem carbon exchange into net assimilation and respiration using  $^{13}\text{CO}_2$  measurements: a cost-effective sampling strategy. *Global Biogeochemical Cycles*, v.17, p. 1-18, 2003.

Park, R. and S. Epstein. Metabolic fractionation of  $\text{C}^{13}$  and  $\text{C}^{12}$  in plants. *Plant Physiol.*, v. 36, p. 133-138, 1961.

Pataki D. E.; Ehleringer J.R.; Flanagan L.B.; Yakir D.; Bowling D.R.; Still C.J.; Buchmann N.; Kaplan J.O.; Berry J. A. The application and interpretation of Keeling plots in terrestrial carbon cycle research. *Global Biogeochemical Cycles*, v.17, p. 1022, 2003.

Penman, H.L. Evaporation, transpiration and evapotranspiration. *In: Vegetation and Hydrology*. Farnham Royal, Comm. Agric. Bureaux. 1963.

Phillips, D.L. Mixing models in analyses of diet using multiple stable isotopes: a critique. *Oecologia*, v. 127, p. 166–170, 2001.

Phillips D.L., Gregg J.W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, v. 136, p. 261–269, 2003.

Plaxton WC, Podesta FE: The functional organization and control of plant respiration. *Crit Rev Plant Sci.*, v. 25, p. 159-198, 2006.

Raghavendra, A. S., and Padmasree, K. 2003. Beneficial interactions of mitochondrial metabolism with photosynthetic carbon assimilation. *Trends Plant Sci.*, v. 8, p. 1360–1385.

Reicosky, D. C.; Lindstrom, M. J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agronomy Journal*, v. 85, p. 1237-1243, 1993.

Revelle, R. Carbon dioxide and world climate. *Sci. Am.*, v. 247, p. 33–41. 1982.

Ribas-Carbo, M., Taylor, N. L., Giles, L., Busquets, S., Finnegan, P. M., Day, D. A., Lambers, H., Medrano, H., Berry, J. A., and Flexas, J. Effects of water stress on respiration in soybean (*Glycine max.* L.) leaves. *Plant Physiol.*, v. 139, p. 466–473, 2005.

Ryan, M. G.; Cavaleri, M. A.; Almeida, A. C.; Penchel, R.; Randy S. S.; Stape, J. L. Wood  $\text{CO}_2$  efflux and foliar respiration for Eucalyptus in Hawaii and Brazil. *Tree Physiology*, v. 29, p.1213–1222, 2009.

Sanquetta, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. *et al.* (Eds.). *As florestas e o carbono*. Curitiba: [s.n.], 2002, p. 119-140.

Tcherkez G, Nogues S, Bleton J, Cornic G, Badeck F, Ghashghaie J. Metabolic origin of carbon isotope composition of leaf dark-respired CO<sub>2</sub> in French bean. *Plant Physiology*, v.131, p. 237–244, 2003.

Thornthwaite, C.W.; matter, J.R. *The water balance*. Publications in Climatology, 8, Centerton, New Jersey. 1955.

Yakir, D. and L.D.S.L. Sternberg. The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange. *Oecologia*, v.123, p. 297-311, 2000.

Yakir, D., Wang, X.F. Fluxes of CO<sub>2</sub> and water between terrestrial vegetation and the atmosphere estimated from isotope measurements. *Nature*, v. 380, p. 515–517, 1996.

Zhang, Q.; Lei, H.M.; Yang, D.W. Seasonal variations in soil respiration, heterotrophic respiration and autotrophic respiration of a wheat and maize rotation cropland in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.180, p. 34–43. 2013.

### CAPÍTULO III

## DETERMINAÇÃO DOS BALANÇOS DE CO<sub>2</sub>, ÁGUA E ENERGIA EM FLORESTAS DE EUCALIPTO

### RESUMO

Este trabalho teve como objetivo medir de forma contínua o balanço de carbono e energia e avaliar as trocas de água em plantios adultos e jovens de eucalipto. Utilizou-se o sistema *eddy covariance* (EC) para as medidas das trocas líquidas de vapor d'água e CO<sub>2</sub> e sensores meteorológicos acoplados ao coletor de dados para caracterizar as variáveis ambientais. Estes sistemas de monitoramento foram instalados em torres micrometeorológicas em áreas experimentais de eucalipto em idades jovem e adulta. Foram possíveis monitorar três dos sete anos de ciclo comercial do eucalipto, contemplando as idades entre 0 – 18 meses (jovem) e 49 – 65 meses (adulto). Após o plantio é observado um aumento crescente na absorção do CO<sub>2</sub> da atmosfera, indicando que a planta está aumentando a fixação do carbono para a produção de biomassa. Na idade adulta, os fluxos de CO<sub>2</sub> possuem um sensível aumento ao longo do tempo de medida, reduzido na estação seca. Em ambas idades é verificado uma relação crescente do índice de área foliar e dos fluxos de CO<sub>2</sub> e água com incrementos em períodos de boa disponibilidade hídrica. Existe uma relação entre a disponibilidade de água, energia e o incremento líquido de carbono culminando no crescimento e manutenção da floresta. Verificou-se maiores taxas de fixação do CO<sub>2</sub>, determinada pela produtividade primária bruta e respiração de CO<sub>2</sub> acumulado na idade jovem. Também foram observadas maiores eficiências de uso da água na época chuvosa em ambos estádios de crescimento (jovem e adulto). O fechamento do balanço de energia apresenta boa correlação entre os valores dos fluxos medidos pelo sistema de EC e pelos sensores meteorológicos, permitindo uma avaliação positiva da qualidade dos dados de fluxo de energia obtidos pelo EC.

**Palavras chave:** *Eddy covariance*, Produção primária líquida (NPP), Produção primária bruta (GPP), respiração do ecossistema.

## 1. Introdução

As florestas têm um importante papel na mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2007), pois se conectam ao clima global pelo ciclo do carbono (C). Estas coberturas abrangem cerca de 4,1 bilhões de hectares da superfície do planeta e contêm 80% de estoque do carbono terrestre acima do solo e 40% abaixo do solo (Dixon et al. 1994). O IPCC reporta que as últimas estimativas para o armazenamento de C terrestre foi de 3300 Mt CO<sub>2</sub>/ano na década de 1993-2003, desconsiderando as emissões da mudança de uso do solo (Denman *et al.* 2007). Estes dados indicam que existem tendências globais positivas como o aumento de plantios florestais e dos esforços na conservação dos biomas existentes, porém muitas florestas primárias continuam a tornar-se degradadas ou convertidas em agricultura em algumas regiões do globo (IPCC, 2007).

Neste contexto, as florestas plantadas são importantes em âmbito do sequestro do carbono e, no sentido econômico. No Brasil, a cultura florestal foi estabelecida como matéria prima para o abastecimento das fábricas de papel e celulose na década de 50, porém após os grandes incentivos fiscais em meados da década de 60 sua expansão foi ampliada (Embrapa, 2003). Apesar da recente implantação desta cultura, o país ocupa atualmente a quarta posição em produção de celulose mundial, sendo o gênero *Eucalyptus* correspondente a 78% das áreas de plantios (Abraf, 2012). O crescente número de pesquisas relacionadas às áreas de manejo sustentável de solos, melhoramento genético, ecofisiologia da produção, dentre outros (Barros et al. 2011; Ferreira et al. 2012), contribuíram de forma decisiva para o aumento da produtividade deste gênero no país ao longo dos anos.

O monitoramento da troca líquida do carbono no ecossistema é importante para entender a dinâmica das trocas de CO<sub>2</sub> (biosefera-atmosfera) e quantificar o tempo de residência do carbono fixado no bioma pela fotossíntese e liberado para a atmosfera pelos processos de respiração autotrófica e heterotrófica. Esforços para melhor entender o balanço de carbono em florestas plantadas têm sido feitos, tendo em vista o alto potencial de fixação de carbono atmosférico desses biomas e as incertezas do armazenamento líquido (Vickers et al, 2011, Gorsel et al. 2013). As redes de medidas contínuas das trocas de C são uma realidade como a Ameriflux, Euroflux, FluxNet Canada, dentre outros (Baldocchi, 2008, Zha et al. 2013), realizando medidas em diferentes ecossistemas.

Os estudos fenológicos da variação interanual da vegetação na produtividade do ecossistema são uma ativa área de pesquisa entre mudanças climáticas em grande parte devido à disponibilidade de medições dos fluxos de CO<sub>2</sub> do ecossistema (Richardson et al. 2010; Pan et al. 2011). Além das características genéticas (endógenas) que determinam a periodicidade dos ciclos biológicos das plantas, sabe-se que os fatores climáticos e bióticos também podem interferir na sazonalidade destes fluxos. Os principais fatores que afetam o curso sazonal da produção primária bruta da floresta são as mudanças no índice de área foliar (IAF), e as capacidades fisiológicas da planta em termos do controle de estômatos, condições meteorológicas e a duração da estação de crescimento (Falge et al. 2002).

O entendimento nos processos de troca de energia entre a superfície da terra e como eles retornam à atmosfera é fundamental para verificar a suscetibilidade e variabilidade do ecossistema ao clima (Eugster et al. 2000). As florestas exercem um importante papel na conversão da energia solar em biomassa pelo processo fotossintético e por sua alta capacidade térmica (Santos et al., 2002). Os efeitos biofísicos causados pelo balanço de energia na floresta incluem mudanças no albedo, na partição do fluxo de calor sensível e latente (L) e rugosidade da superfície, entre outros.

O fluxo de L é um importante componente do balanço de energia da superfície e têm um expressivo impacto no comportamento e na dinâmica da camada limite planetária (Baldocchi et al. 2000). O conhecimento de L ou da evapotranspiração permite avaliar o crescimento da vegetação e o potencial de absorção de carbono assimilado por unidade de água perdida por transpiração, designado como a eficiência de uso da água (EUA) (Cowan e Farquhar, 1977), visto que os fluxos de vapor d'água e gás carbônico (CO<sub>2</sub>) entre as plantas e a atmosfera são fortemente acoplados, pois ambos os gases são difundidos através da abertura dos estômatos. A sazonalidade da EUA pode aumentar o conhecimento do relacionamento do carbono e o ciclo da água, sobretudo durante a estação de crescimento da floresta. Estes estudos contribuem com o balanço hídrico em escalas local, regional e global e a troca de vapor entre a superfície da terra e ecossistemas.

O sistema *eddy covariance* tem sido estabelecido para monitorar continuamente a troca de CO<sub>2</sub>, vapor d'água e energia em uma escala de ecossistemas, quantificando diretamente a troca de massa e energia entre a superfície e a atmosfera (Baldocchi et al. 1988). É um método direto para mensurar os vórtices

turbulentos em um ecossistema e se tornou uma ferramenta de grande uso em pesquisas micrometeorológicas (Hutley et al. 2005; Baldocchi, 2008). Estas medidas fornecem dados consistentes, com valores particularmente originados de medidas contínuas sazonais em distintas condições climáticas e a habilidade de integrar fluxos entre todo o povoamento florestal. Alguns projetos têm combinado as medidas do *eddy covariance* em conjunto com observações simultâneas *in situ* de medidas de produções primárias para entender a relação da absorção de carbono no crescimento das plantas (Gough et al. 2008, Rocha et al. 2009).

Para reduzir a incerteza nas previsões ou projeções futuras das mudanças climáticas globais, o balanço de carbono deve ser claro, contendo medidas observacionais *in situ* para facilitar este entendimento e estudos e assegurar os modelos de estimativas (Tanaka et al. 2008). Existem vários níveis de quantificação do balanço de carbono sendo que a qualidade da informação de base disponível é determinante na fidelidade dos resultados finais.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo determinar de forma contínua os fluxos de carbono, energia e as trocas de água em plantios jovens e adultos de eucalipto, avaliando a influência da sazonalidade climática nestas respostas.

## **2. Materiais e Métodos**

### *2.1. Área de trabalho*

Trabalhou-se em áreas de plantios comerciais da empresa Fibria no município de Brasilândia, Estado do Mato Grosso do Sul. O município encontra-se localizado na unidade geomorfológica do Planalto Sedimentar do Paraná. O clima da região é o tropical, quente e semi úmido, do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, sendo marcado por chuvas no verão e períodos secos durante o inverno com totais anuais médios de 1300 mm de precipitação e temperaturas médias históricas variando de 21,2 a 27,0 °C de acordo com as normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A vegetação nativa da região pertence ao bioma Cerrado de tipologia Cerradão, em estágio médio de regeneração. Em alguns trechos ocorrem sinais de

perturbação com dossel descontínuo e alta densidade de espécies de *Poaceae* (taquaras) (Fibria, 2011).

As áreas de estudo estão representadas na Figura 1. Trabalhou-se em dois talhões de plantios clonais híbridos de *E. grandis* com idades variando entre 0 – 18 meses (jovem) e 49 – 65 meses (adulto). Ambos os plantios possuem espaçamento de 3,6 x 2,5 m, áreas de 81,1 (talhão adulto) e 63,3 ha (talhão jovem)

O talhão jovem corresponde ao solo Latossolo Vermelho distrófico Espessarênico (Lvd2), com textura média leve. O talhão adulto corresponde ao Latossolo Vermelho distrófico típico (Lvd5), com textura média pesada.

Foram alocadas sistematicamente cinco parcelas fixas por talhão de 30 x 30 m cada. Os plantios adulto e jovem correspondem áreas de implantação e de segundo ciclo, respectivamente, onde haviam anteriormente área de pastagens.

As áreas possuem topografia plana com declividade inferior a 4,8 e 7,6 ° nos plantios adultos e jovens, respectivamente. Buscou-se garantir uma distância de *fetch* suficientemente grande, sobretudo na direção predominante do vento (3,9 km adulto e 1,3 km no jovem) para maior homogeneidade horizontal do dossel e menor rugosidade da superfície, evitando assim a modificação do escoamento atmosférico e a alteração da relação fonte/sumidouro, o que leva à advecção horizontal e vertical (Baldocchi et al. 1988)

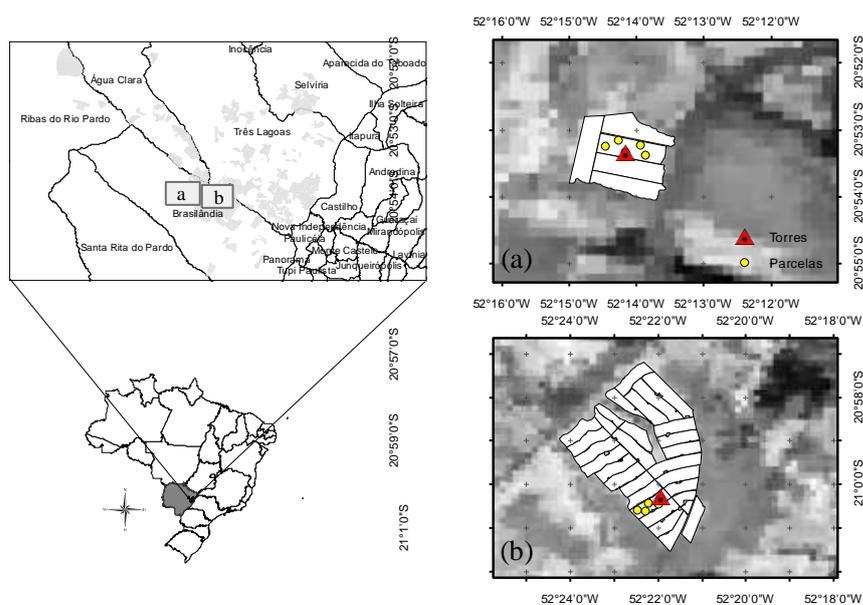


Figura 1. Caracterização das Áreas de estudo no Estado do Mato Grosso do sul (Brasil): alocação das torres e parcelas em plantios de eucalipto jovens (a) e adultos (b) sobrepostos à imagem de satélite do sensor Modis em 05/2013.

## 2.2. *Dados meteorológicos*

Foram instaladas estações meteorológicas automáticas (EMA's) em duas torres alocadas nos talhões dos plantios jovem e adulto. Cada torre conta com os seguintes sensores: piranômetro, modelo LI-200SA (Li-cor, Nebraska, USA) para medidas da radiação solar global; saldo radiômetro, modelo NR-Lite2 (Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah) para o saldo de radiação; sensor quântico, modelo LI-190SB (Li-cor, Nebraska, USA) para a radiação fotossinteticamente ativa; pluviômetro, modelo CS700-L (Hydrological Services, Liverpool, Australia) para a precipitação; anemômetro sônico (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) para velocidade e direção do vento; termistor e capacitor modelo HMP45 (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) para a temperatura e umidade relativa do ar. Trabalhou-se com frequência de leitura de dados de cinco segundos e registros de médias ou integrações em intervalos de 30 minutos.

O sensor de fluxo de calor no solo, modelo HFP01, REBS, Radiation and Energy Balance Systems, Seattle, WA, USA, foi instalado à 8 cm de profundidade nos centros das linhas e entrelinhas, para cobrir variações espaciais diferenciais do calor sensível na superfície.

A umidade do solo foi monitorada utilizando o sensor EnviroSMART (Sentek, SA, Austrália) com intervalos de armazenamento de dados de 30 minutos. Os tubos de acesso de ambos os equipamentos foram instalados a 1,8 m de profundidade e em posições de linha e entrelinha do plantio.

O período de medidas compreendeu o intervalo de 11/2011 a 05/2013 no plantio adulto e de 09/2011 a 05/2013 no plantio jovem.

A Figura 2 caracteriza os períodos e idades jovem e adulta em dados médios mensais. Verifica-se que os meses de julho a outubro são aqueles com menores umidades no solo, embora em setembro de 2012 tenha havido um pico devido a uma chuva de 75,7 mm concentrados em uma semana em plena estação seca. Um aumento do DPV e maiores temperaturas também são observados neste período.

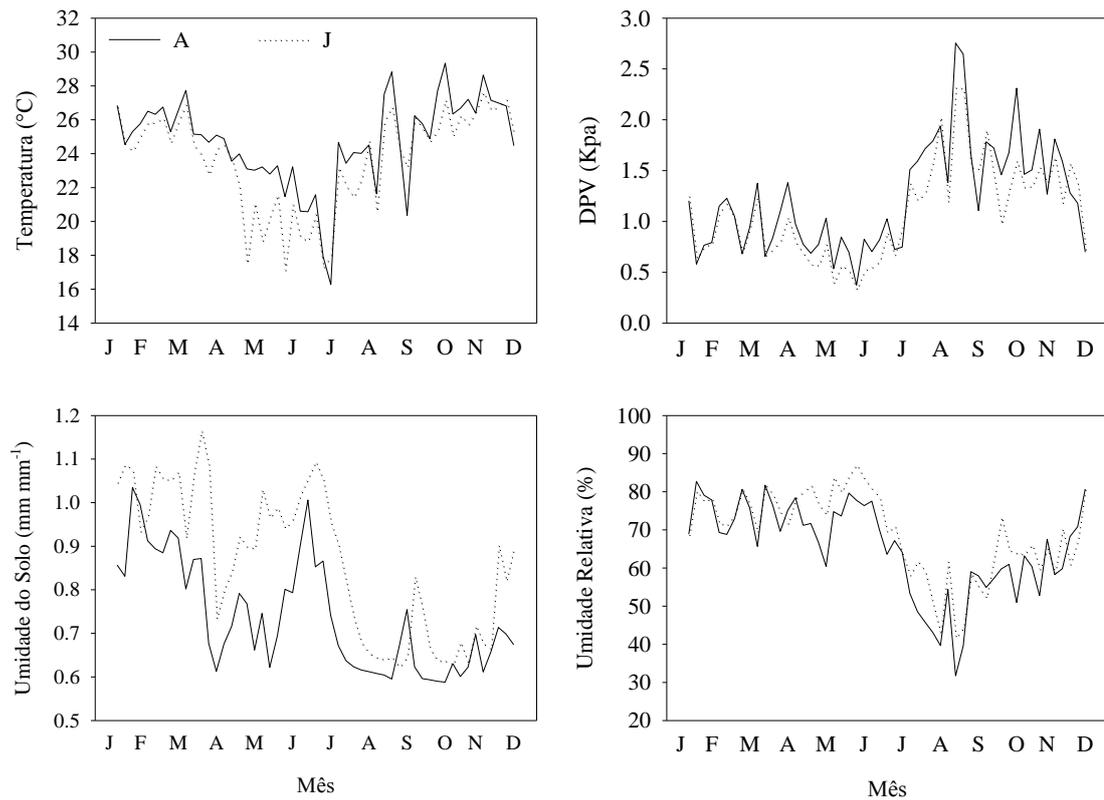


Figura 2. Dados semanais médios da temperatura média do ar, déficit de pressão de vapor (DPV), umidade do solo e umidade relativa do ar durante o período de medidas em plantios de eucaliptos jovens (J) e adultos (A).

O cálculo da evapotranspiração de referência foi feito a partir do modelo desenvolvido por Penman-Monteith (1965), que inclui os componentes aerodinâmicos e os do balanço de energia, em dados horários.

### 2.3. Análise dos dados do sistema eddy covariance (EC)

Os fluxos foram coletados usando o sistema EC com medidas em 3-D do vento (horizontal do vento a leste, velocidade horizontal do vento a norte e a velocidade vertical do vento) e temperatura do ar por um anemômetro sônico (modelo CSAT3; Campbell Scientific, Logan, UT, USA) e o analisador de gás infravermelho, sistema aberto (LI7500 LI-COR, Lincoln, NE). Os instrumentos foram montados ao topo das torres em posições de 26,0 m do plantio adulto e em duas alturas ao longo do período de medidas: 5,6 e 9,3 m no plantio jovem.

Os fluxos foram calculados em médias de 30 minutos utilizando o software Alteddy, versão 3.9 (Alterra, University of Wageningen, The Netherlands). Os dados foram registrados em um *datalogger* (modelo CR1000; Campbell Scientific),

gravados em frequência de 20 Hz para melhor armazenamento das flutuações do vento.

Foram realizadas as correções do efeito lateral do vento na velocidade sônica e na temperatura e vapor d'água por meio da rotação tridimensional das coordenadas (McMillen 1988). Os efeitos das flutuações da densidade do ar causadas pelos fluxos verticais de calor sensível e de vapor de água foram corrigidos utilizando a metodologia proposta por Webb et al.,(1980) e Leuning e Moncrieff (1990).

Aplicaram-se filtros da velocidade de fricção do vento ( $u^*$ ) para descartar dados noturnos em baixas condições de mistura por não serem representativos no fluxo líquido do ecossistema e para evitar condições advectivas, que tende a ocorrer em condições de baixa turbulência atmosférica (Vickers et al. 2011). O valor crítico de  $u^*$  utilizado foi de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ .

A influência da umidade do ar deve ser eliminada das medidas do fluxo de calor sensível, uma vez que o cálculo do fluxo de calor sensível é efetuado a partir das medições da temperatura virtual. Para isto, utilizou-se a correção desenvolvida por *Schotanus/Liu* (Schotanus et al. 1983).

#### 2.4. *Determinação das trocas gasosas líquidas (NEE) e brutas (GEP) do ecossistema*

A produção primária líquida (NPP) é a diferença entre o  $\text{CO}_2$  absorvido pela fotossíntese e o perdido pela respiração do ecossistema (RE) mensurado pelo EC.

Para o particionamento do fluxo líquido em GEP e RE, foram utilizados diferentes algoritmos para estimar os dados diurnos baseados no algoritmo proposto por Lasslop et al. (2010), onde são estimados pela curva de resposta da luz, contabilizando efeitos da temperatura na sensibilidade da respiração, incluindo o modelo de Lloyd e Taylor (1994) e incorporando variações impostas pelo DPV.

Os algoritmos do particionamento são descritos em um ferramenta *on line* disponível em: <http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/>.

#### 2.5. *Preenchimento de falhas*

O preenchimento de falhas foi feito em uma inspeção visual, baseado nas classes de qualidade propostas por Foken et al. (2004), onde foram eliminados os *flags* > 1. Verificaram-se *gaps* nas observações, seja pelo mal funcionamento do

sistema ou pela filtragem, obedecendo os critérios de rejeição para intervalos de  $u^*$ , com 23,4 e 14,0% dos dados excluídos nos plantios adultos e jovens, respectivamente.

A série de dados foi preenchida utilizando o algoritmo proposto por Falge et al. (2001) e Reichstein et al. (2005) para a interpolação dos dados. Este algoritmo usa o método *look-up table*, sendo consideradas as covariâncias dos fluxos com as variáveis micrometeorológicas e a auto correlação temporal destes fluxos. Desta forma, os valores perdidos são substituídos pelo valor médio em condições meteorológicas similares dentro de uma janela de sete dias. As condições similares representam um desvio inferior a  $50 \text{ W m}^{-2}$ ,  $2,5^\circ\text{C}$ , e  $5,0 \text{ hPa}$  da radiação solar, temperatura do ar e o DPV, respectivamente.

## 2.6. *Balanço de energia*

Foi realizado o balanço de energia considerando as variáveis mensuradas pelo EC. Esta abordagem permite maior compreensão da dinâmica das florestas no processo de absorção e emissão do  $\text{CO}_2$  para a atmosfera.

Para melhor acurácia e confiabilidade das medidas, foi realizado a relação entre sensores do sistema EC e micrometeorológicos (Twine et al. 2000), onde, pelo princípio da conservação de energia na superfície, têm-se:

$$R_n = L + H + G + \Delta S \quad (1)$$

Onde: L e H são fluxos de calor latente e sensível, respectivamente, determinados pelo EC;  $R_n$  é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor no solo, mensurados por equipamentos micrometeorológicos e S é a energia armazenada na biomassa e no dossel, determinada de acordo com as equações propostas por Moore e Fisch (1986) a partir de dados de temperatura e umidade específica do ar.

## 2.7. *Cálculo da evapotranspiração e da eficiência do uso da água (EUA)*

A evapotranspiração real (ETR) foi calculada usando a equação 2 (Lin et al. 2012), a partir de dados de L ( $\text{W m}^{-2}$ ) do sistema EC, e T (temperatura do ar acima do dossel em  $^\circ\text{C}$ ). Estes resultados foram integrados para o total diário ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

$$ET = \frac{0,43LE}{597 - 0.564T} \quad (2)$$

Para avaliar a EUA ao longo do crescimento da floresta, determinou-se a relação da produção primária bruta (GPP) e a evapotranspiração diária (ET) em base diária, conforme utilizado por Yu et al.,(2008).

### 2.8. Estimativas do IAF

Para determinar o índice de área foliar (IAF), foram abatidas três árvores por parcela em cada talhão em seis coletas de campo nos plantios jovens e adultos. Para esta análise, elegeram-se três árvores/parcelas que apresentaram características médias de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura, obtidos do inventário amostral por parcela. Foi obtido o peso fresco total do dossel foliar e das amostras coletadas em diferentes estratos do dossel conforme metodologia adotada por Dovey e du Toit (2006). As amostras foram levadas ao laboratório para a obtenção da área foliar utilizando o equipamento LI-3000 (Licor, Nebraska, USA) e do peso seco das folhas por meio de uma estufa de circulação forçada a 65°C.

Para a estimativa do IAF em diferentes períodos ao longo do ano, utilizou-se os índices de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI) produto do sensor MODIS (MOD13Q1). Totalizaram-se 57 imagens obtidas gratuitamente por meio da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) no endereço eletrônico: <https://lpdaac.usgs.gov>.

Cada imagem é um produto referente a múltiplas observações em uma resolução temporal de 16 dias e resolução espacial de 250 metros em que foram aplicados filtros de qualidade, de nuvem e de geometria de visada, que eliminam, por exemplo, dados com contaminação por nuvem (Justice et al. 1998). Foram realizados processamentos para disponibilizar as imagens finais em resolução radiométrica de 8 bits e sistema de projeção UTM.

## 3. Resultados e Discussões

A Figura 3 descreve o fluxo horário do carbono no ambiente, com medidas obtidas no período pré-plantio e ao longo do crescimento do eucalipto até 18 meses. Como indicativo da fotossíntese e da respiração, adotou-se que os valores positivos

indicam fluxos de carbono da vegetação para a atmosfera (respiração) e valores negativos indicam fluxos de carbono da atmosfera para a vegetação (fotossíntese).

No mês de outubro (2011), onde não havia se iniciado o plantio, os fluxos foram em geral, positivos com pequenas amplitudes diárias na variação do carbono presente na atmosfera. O incremento do fluxo se deve à respiração do solo realizada por organismos heterotróficos que provavelmente tiveram sua atividade metabólica favorecida devido à presença de resíduos de matéria orgânica (Catellan e Vidor, 1990) provindos do ciclo anterior somada à radiação solar, convertida em calor sensível disponível ao sistema.

A partir do plantio (novembro – 2011), verifica-se um aumento crescente na absorção do CO<sub>2</sub> da atmosfera, indicando que a planta está aumentando a fixação do carbono para a produção de biomassa. Verifica-se uma redução dos fluxos no período mais seco (agosto a novembro – 2012) onde são observados os menores conteúdos de água no solo e maiores DPV. O pico da atividade fotossintética observado no mês de setembro também pode ser observado no curso anual destas variáveis meteorológicas.

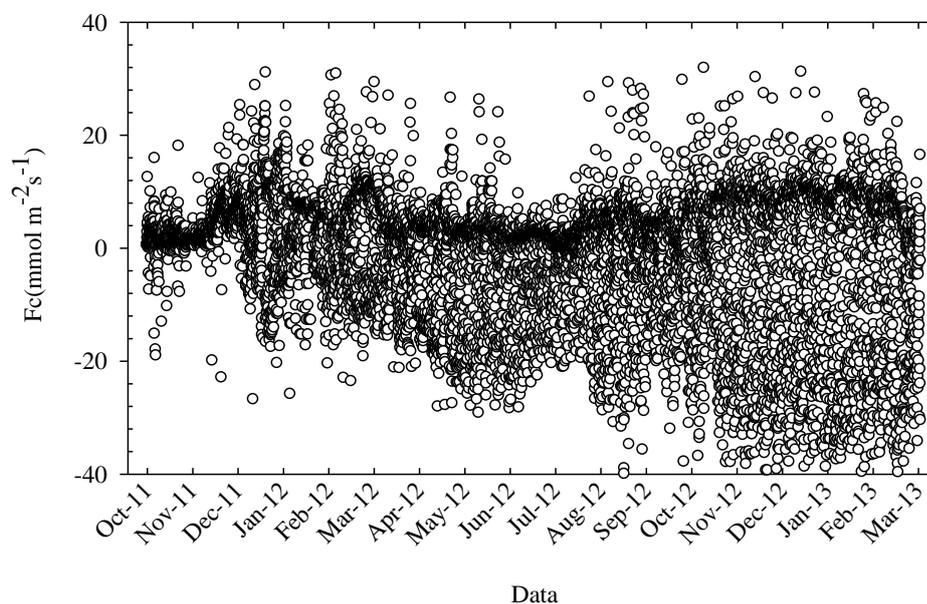


Figura 3. Fluxos de CO<sub>2</sub>(Fc) mensurados em dados horários a partir do plantio até os 18 meses de idade em árvores jovens de eucalipto no período compreendendo os anos de 2011 – 2013.

É verificado que na idade adulta (Figura 4), os fluxos de CO<sub>2</sub> possuem um sensível aumento ao longo do tempo, interrompido pela redução verificada na

estação seca. Observa-se que a drástica redução verificada no mês de setembro corresponde a falha na obtenção de dados do mês de agosto, início do período de estiagem.

Assim como observado no plantio jovem, a redução dos fluxos de  $\text{CO}_2$ , com valores médios diurnos de  $-2,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  no período seco devem-se à resposta da planta à condição restrita do ambiente e confirma a conclusão de outros autores (Mielke et al. 1999, Almeida e Soares, 2003) e de estudos ecofisiológicos realizados nesta mesma área de estudo (Rody et al. 2013) indicando que o eucalipto tem eficiente controle no mecanismo de fechamento estomático, reduzindo o influxo de  $\text{CO}_2$  para a fotossíntese, porém evitando a perda d'água nesta época.

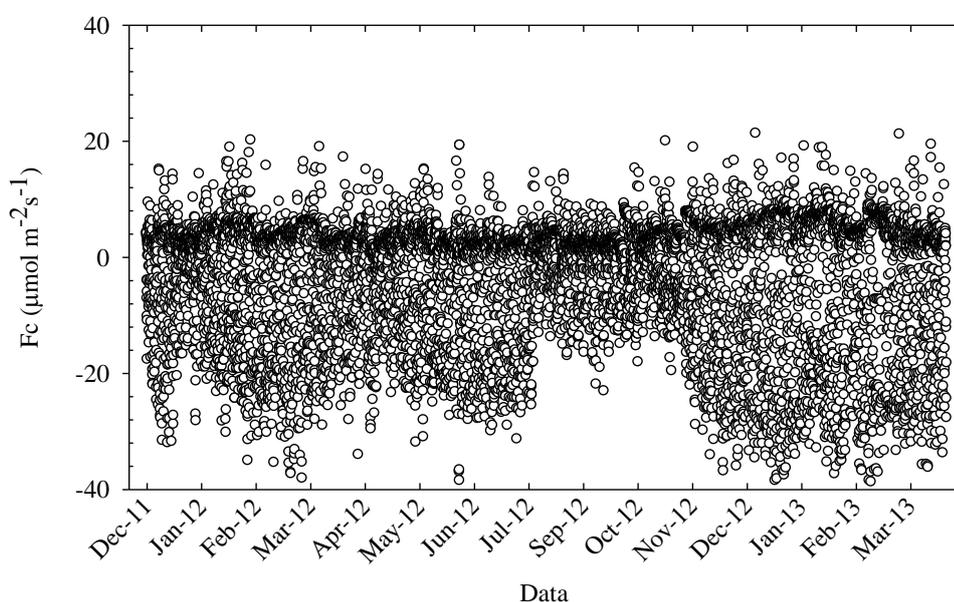


Figura 4. Fluxo de  $\text{CO}_2$  ( $F_c$ ) mensurados em dados horários em árvores de eucalipto adulto em idades de 45 a 65 meses, no período compreendendo os anos de 2011 – 2013.

No período diurno, a floresta se comporta como sumidouro de  $\text{CO}_2$  (Figura 5), onde é observada uma relação entre a produção primária líquida (NPP) e a radiação fotossinteticamente ativa ( $\text{PAR} > 0$ ) expressadas nas curvas horárias. Os horários com maiores valores de PAR são próximos àqueles onde a planta mais fixa carbono, expresso pela produção primária bruta (GPP). Os valores de NPP e GPP tendem a zero durante a noite ( $\text{PAR} = 0$ ) quando as emissões do solo e a respiração foliar (RE) combinam-se como as maiores fonte de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera.

Este comportamento evidencia a relação entre a disponibilidade energética e o incremento líquido culminando no crescimento e manutenção da floresta. Dentre as

medidas da radiação na faixa fotossinteticamente ativa, tem sido observado que a radiação difusa contribui com maiores taxas relativas de assimilação pelas folhas em função do seu caráter multidirecional em trabalhos realizados em baixas (Gu et al. 2003) e altas latitudes, (Knobl e Baldocchi, 2008).

Os maiores valores de GPP observados no período da manhã podem ser devido a picos nos fluxos de CO<sub>2</sub>, resultantes do escoamento noturno do CO<sub>2</sub> produzidos pela respiração foliar, que se acumula devido à inibição do fluxo turbulento noturno causado por condições de estabilidade atmosférica (Moncrieff et al. 1996).

Durante a estação chuvosa (Figura 5 - a,d), o NPP entre as idades de 15 e 62 meses apresentam valores semelhantes com picos de 30,6  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  às 10 h e 30,9  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  às 12 h respectivamente. Isto se difere na estação seca (Figura 5 - b,e) onde, além da produção ser reduzida, o plantio jovem assimila mais carbono atmosférico em resposta à maior taxa de crescimento observado aos 10 meses, mesmo em condições restritas do ambiente. Durante este período, a maior absorção líquida está entre as 10h, como uma provável influência de uma menor disponibilidade de fluxo de radiação (623,4  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) comparada à chuvosa (946,8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e do incremento médio do DPV nesta estação em relação ao período chuvoso (1,4 Kpa).

Verifica-se que no período chuvoso, a floresta fixa carbono atmosférico ao longo do dia, em média, por 12 e 11 h respectivamente, nos plantios jovem e adulto. No período seco, a maior absorção líquida se dá durante 10 h para ambas as idades.

Nas áreas recém-plantadas (Figura 5,c), é observado uma variação constante da RE, sendo o solo o componente de maior contribuição desta resposta a luz da decomposição da matéria orgânica, conforme discutido anteriormente. Nesta condição, apesar do incremento energético gerado pela PAR, os valores de GPP, NPP e RE não possuem a mesma tendência da curva ao longo do dia.

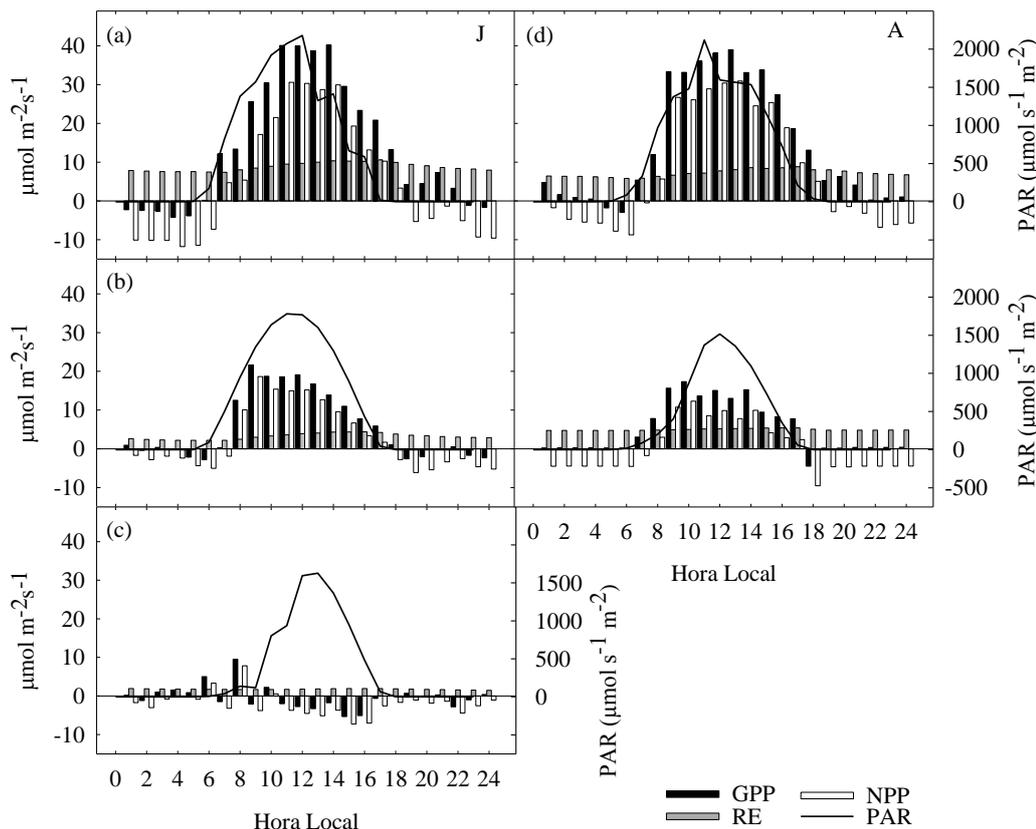


Figura 5. Medidas horárias da produção primária bruta (GPP), respiração do ecossistema (RE) e produção primária líquida (NPP) e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em estações chuvosas em 02/2013 (a,d), secas em 09/2012 (b,e) e no início do plantio do eucalipto 10/2011 (c). A primeira coluna dos gráficos corresponde ao plantio jovem (J) e a segunda ao adulto (A).

Ao analisar a tendência da variação diária em carbono absorvido/perdido por dia, observa-se que o plantio jovem apresenta uma alta taxa de incorporação de carbono, representado pelo GPP nos períodos iniciais (Figura 6-a), com maior inclinação da reta ( $\theta$ ) de acumulação na relação com dias percorridos no ano de 2012 ( $\theta = 8,8$ ), comparadas ao adulto ( $\theta = 6,0$ ). Em 2013, esta taxa de variação aumenta e a diferença entre as idades é reduzida ( $\theta = 12,8$  e  $11,4$  para jovem e adulto, respectivamente). O acúmulo do GPP do ano de 2012 no plantio adulto está subestimado considerando os dados perdidos no período de agosto, porém esta diferença tende a não ser grande devido à baixa atividade fotossintética verificada na época seca.

Semelhante ao GPP, a RE diária é maior no plantio jovem em relação ao plantio adulto (Figura 6-c,d), com maiores valores na estação chuvosa, o que pode ser melhor visualizado pelo RE acumulado. Sabe-se que a temperatura apresenta

relação crescente com a RE em diferentes ecossistemas florestais (Yasuda et al. 2012), porém, em escala diária e mensal, não foram observadas correlações significativas entre estas variáveis em ambas idades. Em escala horária, a relação é maior na época chuvosa ( $R^2=0,8$ ) comparada à seca ( $R^2=0,6$ ) em valores médios entre as idades, mas deve-se ressaltar que estes dados possuem o viés das estimativas diurnas de fotorrespiração onde temperatura é uma das variáveis independentes.

Com as altas taxas respiratórias, o acúmulo do NPP no plantio jovem somente se torna crescente a partir de março (2012) (Figura 6-c) devido às medidas integradas das respirações autotróficas e heterotrófica no sistema. Desta forma, no início do plantio o total respirado foi maior que o carbono incorporado pela fotossíntese no ecossistema.

No período em que o NPP se torna semelhante entre as idades jovens e adultas (Figura 6 - e,f), as florestas de eucalipto incorporam cerca de  $1,3 \text{ T ha}^{-1}\text{mês}^{-1}$  de carbono. Quando é observado um crescimento lento do plantio adulto, em épocas de baixa disponibilidade de recursos hídricos e energéticos, esta fixação se deu em  $0,2 \text{ T ha}^{-1}\text{mês}^{-1}$ . A baixa assimilação é evidenciada por um período constante na reta de acúmulo.

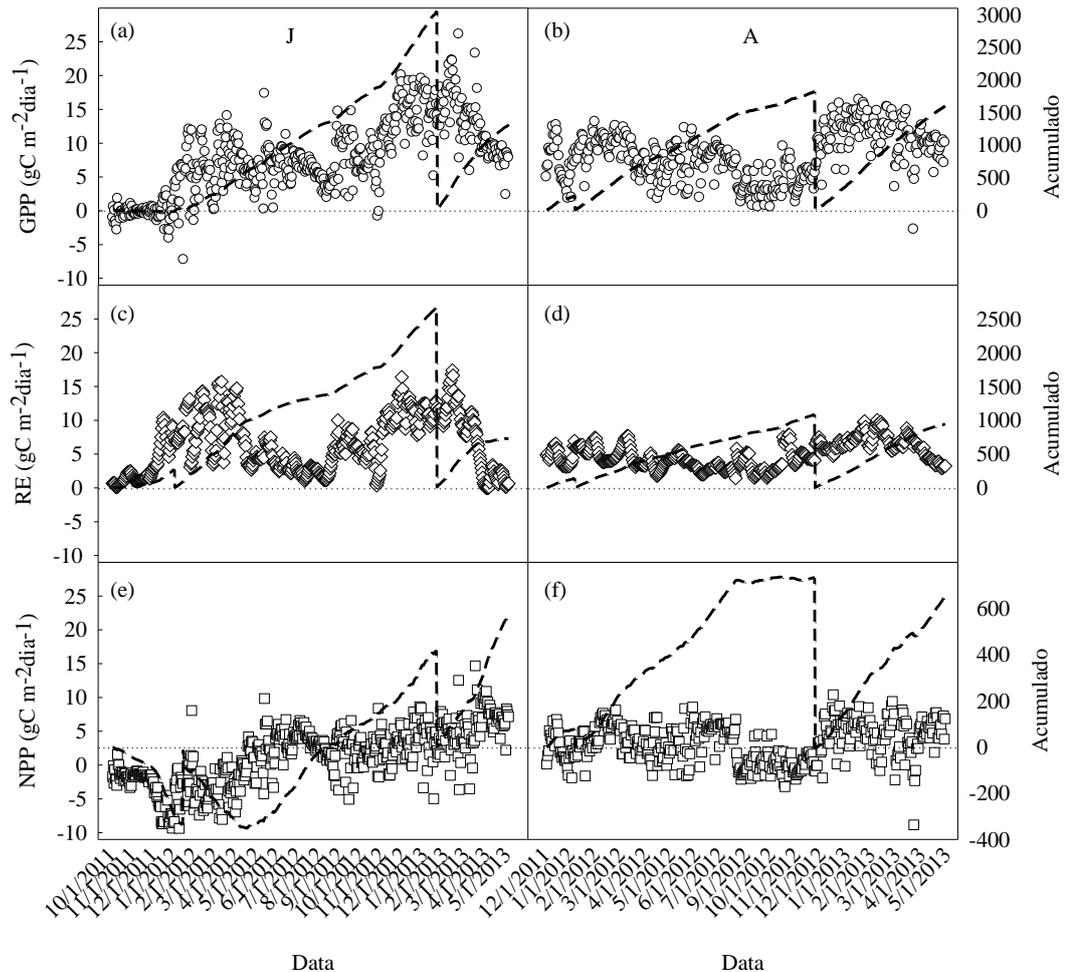


Figura 6. Variação diária da: (a,b) produção primária bruta (GPP); (c,d) respiração do ecossistema (RE) e (d,e) produção primária líquida (NPP) e o acúmulo anual destas variáveis, representados pelas linhas pontilhadas. A primeira coluna dos gráficos corresponde ao plantio jovem (J) e a segunda ao adulto (A).

O fechamento do balanço de energia (Figura 7) apresenta boa correlação entre os valores dos fluxos medidos pelo sistema de EC (fluxo de calor sensível e latente) e medidos pelos sensores meteorológicos (saldo de radiação, fluxo de calor no solo e energia armazenada pelo sistema), embora o coeficiente angular tenha sido menos preciso na idade jovem. O coeficiente de determinação encontrado para ambas as idades ( $R^2 = 0,83$ ) está entre aqueles valores médios reportados na literatura (Wilson et al. 2002). Estes resultados são satisfatórios diante do grande número de dados avaliados, permitindo uma avaliação positiva da qualidade dos dados de fluxo de energia obtidos pelo EC.

A lacuna entre o completo fechamento do balanço de energia pode ter diversas fontes de erros (Lin et al. 2012). A equação utilizada para a estimativa do armazenamento de energia na biomassa e no dossel foi originalmente desenvolvida

para florestas nativas da Amazônia que, apesar de também ser uma floresta perene, se difere por exemplo na transmissão da radiação ao longo do dossel das florestas de eucalipto. Outra fonte de erro deve-se a perda de dados em períodos de abundantes chuvas registrados como ruídos pelo analisador de água e CO<sub>2</sub>, de caminho aberto, o que contribui com subestimativas dos dados do sistema EC nesta época.

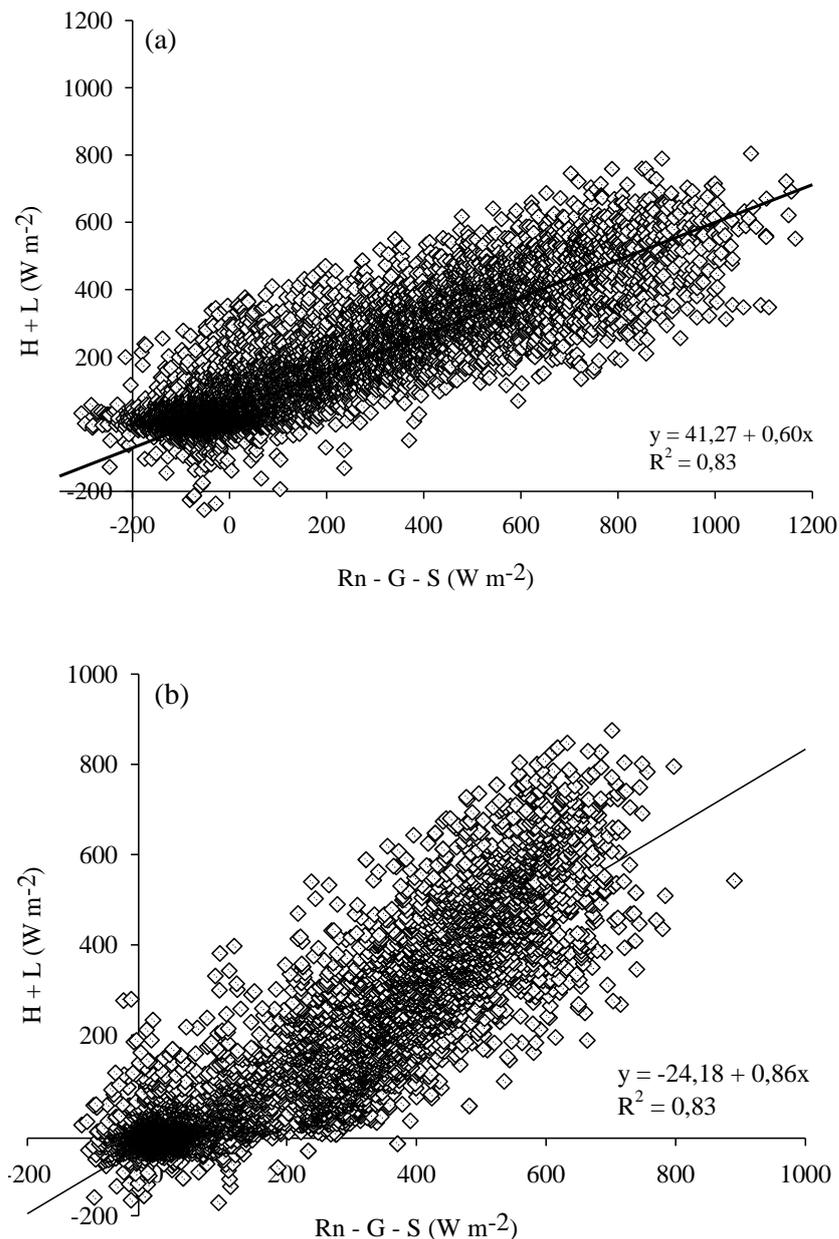


Figura 7. Relação entre a energia disponível no sistema ( $Rn - G - S$ ), provindo de medidas de sensores micrometeorológicos e a soma dos fluxos de calor sensível e calor latente ( $H + E$ ) por medidas do EC.  $Rn$  é o saldo de radiação,  $G$  é o fluxo de calor no solo e  $S$  é a energia armazenada na biomassa e no dossel nos plantios jovem (a) e adulto (b). Os valores representam médias horárias ( $n(a) = 10.252$  e  $n(b) = 14.328$ ).

A quantificação dos componentes do balanço de radiação e de energia em superfícies de plantios de eucalipto é importante para se avaliar o uso de água, a eficiência fotossintética e o microclima no dossel da cultura. Verifica-se a variação sazonal dos fluxos de energia em distintas fases de crescimento do plantio (Figura 8). A tendência encontrada nas medidas de fluxo de energia em escala horária corresponde aos padrões observados por outros pesquisadores (Arruda, 2001; Oliveira et al. 2009), onde os valores dos ciclos diários das componentes mensuradas tendem a apresentar um acréscimo dos fluxos até as 12h e posterior redução.

Na estação chuvosa, o fluxo de calor latente (L) é o componente mais expressivo, correspondendo a 70,6% da partição da relação L/Rn (Figura 9-a) no plantio jovem e 79,5% no adulto. Vários trabalhos com balanço de energia em culturas anuais e perenes concluíram que a maior porção do saldo de radiação é transformada em fluxo de calor latente (Teixeira, 2001; Cunha et al. 2002; Pezzopane e Pedro Júnior, 2003). De fato, as médias mensais de L foram superiores aos demais fluxos na maioria dos meses mensurados, com exceção da época seca que, na idade jovem apresentou-se semelhante ao fluxo de calor sensível (H) e a adulta que foi inferior. Este fluxo é mais intenso devido à maior quantidade de energia necessária para a mudança da fase física da água, e tornou-se expressivo à medida que aumentou a superfície foliar do dossel (Figura 8 c,a,d).

Com a menor quantidade de água presente no sistema, e menor condutância estomática das plantas para evitar a perda d'água via transpiração (Rody et al. 2013), na época seca, H se torna o componente com maior participação no consumo energético de 47,2 e de 59,6% da relação H/Rn em jovens e adultos, respectivamente. Sob esta condição, uma maior fração da radiação solar tende aquecer a superfície da cultura e do solo, o que promove uma elevação do fluxo de calor sensível para a atmosfera e, conseqüentemente, um aumento da temperatura do ar (Wu et al. 2006).

No início do plantio, são observados maiores valores do fluxo de calor no solo (G). A energia radiativa incidente que nesta fase, possui baixa absorção e interceptação pelo dossel, incrementa os valores de G (Figura 8-c). Quando a cultura está estabelecida, G se torna inferior aos demais componentes, mantendo-se em geral constante. Este fluxo contribui em média de 7% da relação G/Rn quando a cultura estava com idade de 10 meses (8/2012) e posteriormente, à medida que avança a idade, esta relação se torna constante com cerca de 1,5% de Rn. A quantificação

deste fluxo é importante, uma vez que a temperatura do solo, em nível superficial ou mais abaixo, influencia no metabolismo celular, no crescimento radicular, assim como na germinação da planta. Os valores de S contribuíram com menos que 1% dos valores de Rn.

Ao longo do dia, são observadas pequenas flutuações nas curvas, que podem ser causadas por turbilhões mais aquecidos e úmidos gerados próximos à superfície que são deslocados verticalmente, sendo substituídos por turbilhões menos aquecidos. Estes movimentos são responsáveis pelo transporte vertical (fluxos) de L, H e do CO<sub>2</sub>.

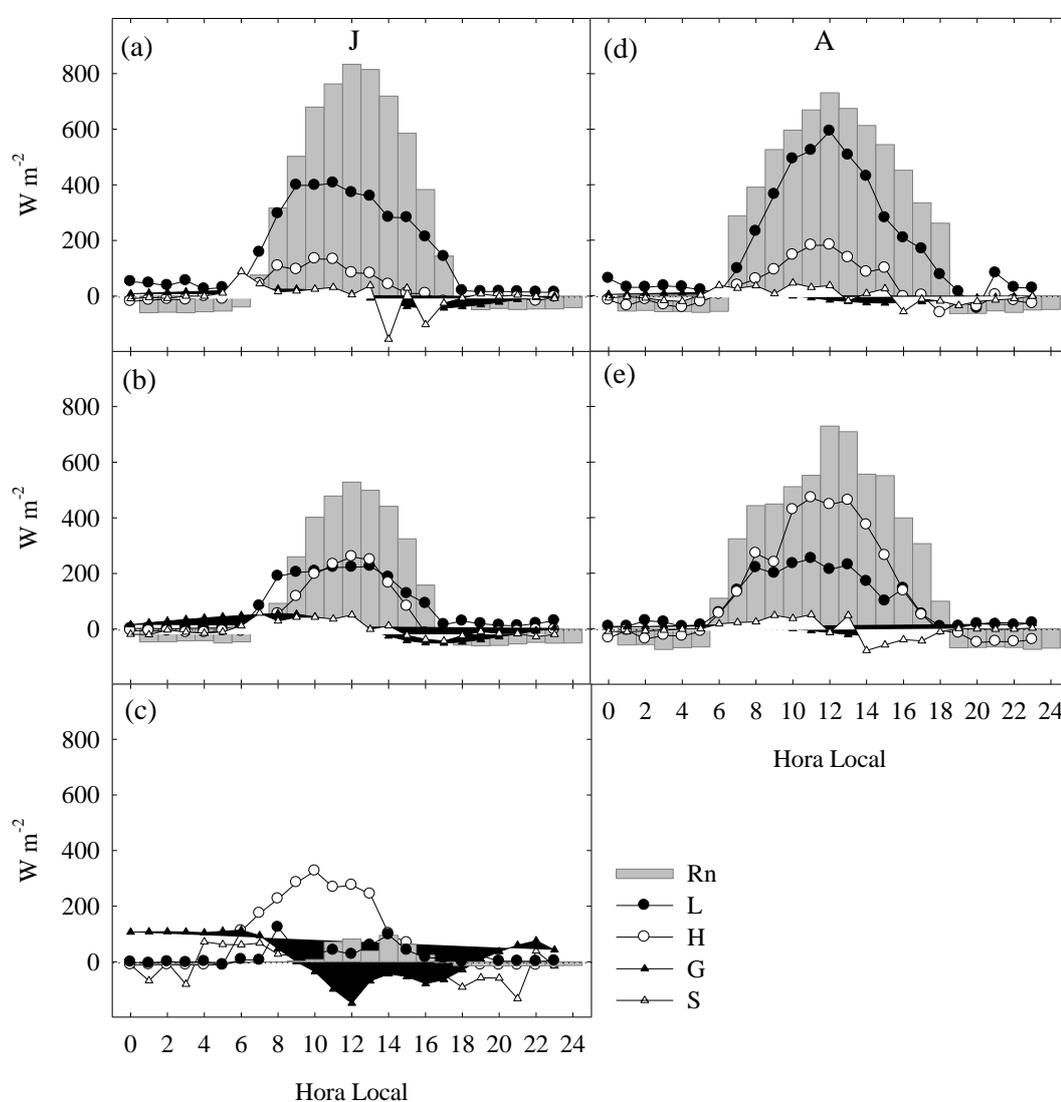


Figura 8. Variação horária dos fluxos de calor latente (L), sensível (H), saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo (G) e armazenamento de energia na biomassa e no dossel (S) em estações chuvosas em 02/2013 (a,d), secas em 9/2012 (b,e) e no início do plantio do eucalipto em 10/2011 (c). A primeira coluna dos gráficos corresponde ao plantio jovem e a segunda ao adulto.

O IAF é um índice que expressa a produtividade do plantio e é útil para melhor entendimento do comportamento sazonal das trocas gasosas entre o ambiente e as plantas de eucalipto. Uma boa correlação é observada entre esta variável e os índices de vegetação, produtos do Modis (Figura 9).

O ponto de saturação na curva exponencial do NDVI ocorreu em valores de IAF próximo a cinco, indicando a baixa sensibilidade do índice em responder à variações em dosséis mais densos. É observado um comportamento linear do IAF com o EVI com substancial melhora na sensibilidade às alterações do IAF em relação ao NDVI, conforme citado por Huete et al. (2002). Assim, utilizou-se o índice EVI para realizar a curva de desenvolvimento ao longo do tempo de plantio do eucalipto.

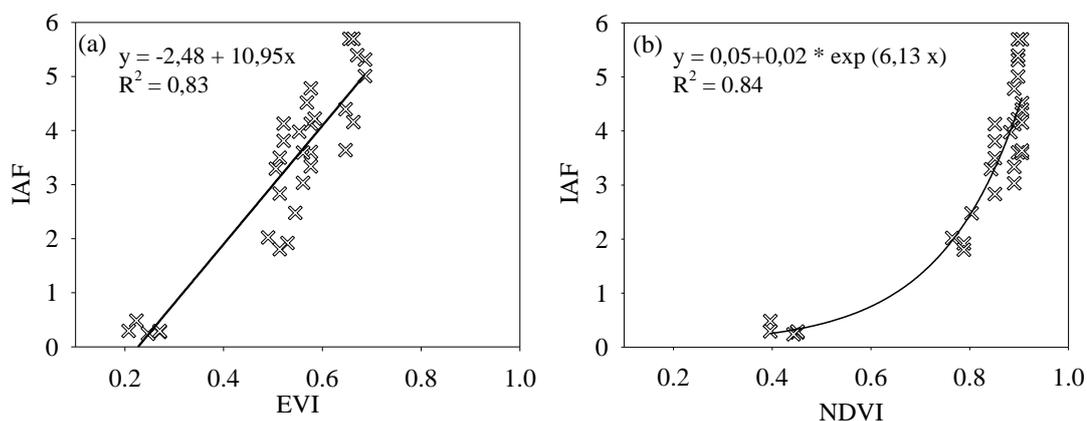


Figura 9. Dispersões dos dados de IAF obtido por medidas destrutivas e da reflectância dos índices EVI (a) e NDVI (b) do sensor Modis.

A evapotranspiração real (ETR) mensurada pelo EC e de referência (ET<sub>0</sub>) estimadas por Penman Monteith são apresentadas em valores diários durante o período de medidas (Figura 10) junto ao IAF.

No início do plantio, até o período de janeiro (2012), onde os valores de IAF são próximos a zero (Figura 10-a), a evaporação parece ser o processo a governar as respostas de ETR. Com o aumento da densidade foliar, a tendência é que haja maior superfície para a realização de trocas gasosas de água e CO<sub>2</sub>, conforme foi verificado na Figura 3 e 4. Desta forma, pode se inferir que a transpiração é o processo com maior consumo hídrico diário comparado a evaporação visto que ETR aumenta de forma expressiva ao longo do crescimento. Este resultado é confirmado por Lin et al.

(2012) onde foi determinado que 6% dos componentes da ET é correspondente a evaporação do solo em florestas de coníferas.

Durante a fase inicial do ciclo do eucalipto, os valores de ETR são inferiores ao ET<sub>0</sub>, com uma diferença média de 4,2 mm dia<sup>-1</sup> até os três meses de idade. A ET<sub>0</sub> melhor se aproxima das medidas reais quando a cultura possui IAF maior que 3. No plantio adulto (Figura 10, b), onde os valores médios de IAF são de 3,6, a magnitude destas variáveis é semelhante.

Verifica-se que durante a estação seca, o IAF foi reduzido assim como os valores de ETR e ET<sub>0</sub>, evidenciando a relação clima-planta, onde a sazonalidade climática tem influencia em ambas idades. Os valores médios de ETR e ET<sub>0</sub> foram de 2,6 e 2,4 mm dia<sup>-1</sup> nesta estação, com redução de 23,6 e 37,4 % em relação ao período chuvoso seguinte em plantios jovens e adultos, respectivamente.

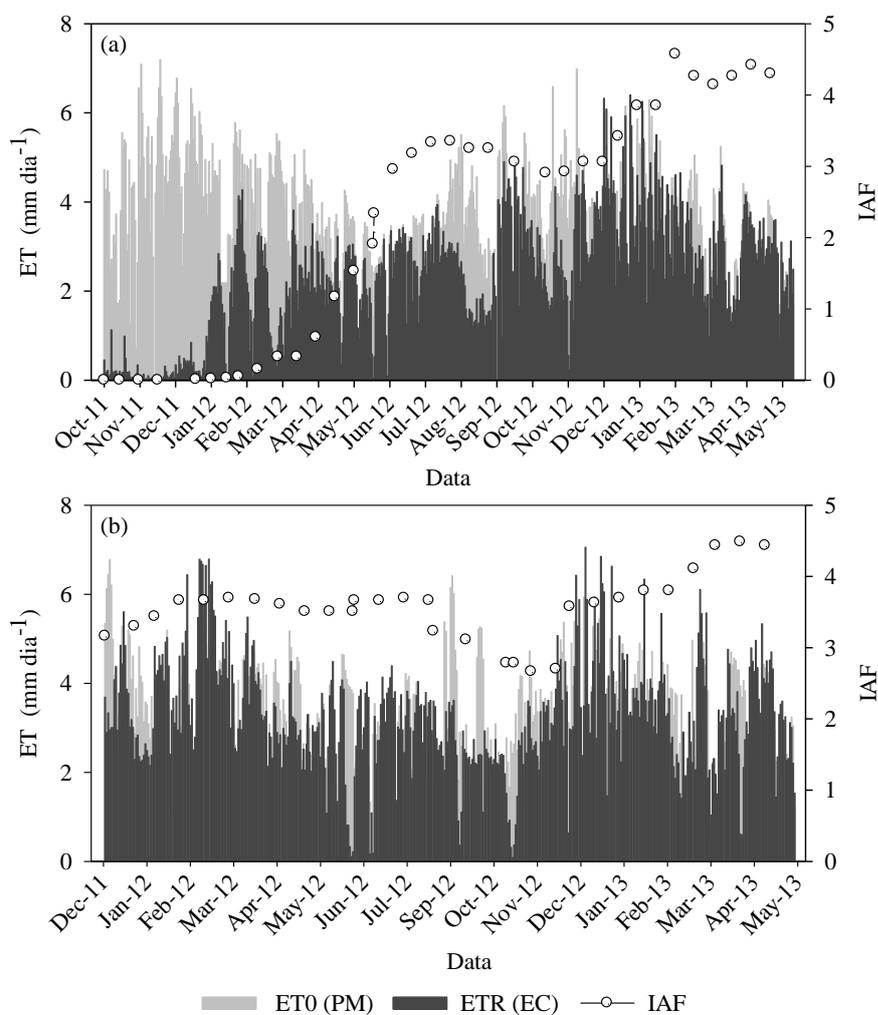


Figura 10. Evapotranspiração real, determinada pelo método Eddy Covariance (EC) e de referência por Penman Monteith (PM) e o índice de área foliar (IAF) para as idades jovens (a) e adulta (b) de eucalipto.

A eficiência do uso da água possui valores médios mensais negativos no início do plantio, onde a incorporação de biomassa via fotossíntese é bastante reduzida e posteriormente estes se tornam positivos (Figura 11). Medidas mais homogêneas, com menores desvios, são obtidas no plantio adulto onde a incorporação de carbono ocorre em taxas mais lentas.

Observa-se que o plantio jovem é em geral, mais eficiente em alocar carbono por unidade de massa de água consumida. Esta diferença é evidenciada em períodos de menor oferta de água no ambiente, onde ambas as idades apresentam o EUA reduzido.

A literatura reporta valores de EUA para plantios de eucalipto, concordantes com as magnitudes e variações impostas pelo clima como os resultados deste trabalho. Radomiljac (1999) estudando *E. camaldulensis* irrigados com idades variando entre 90 e 180 dias encontrou valores diurnos de EUA variando entre 0,20 e 3,70 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O. Mielke *et al.* (2000), verificou que os valores de eficiência do uso da água variaram entre 5,40 e 11,0 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O em híbridos de *E. grandis* com nove anos de idade na região costeira do Estado do Espírito Santo. Stape *et al.* (2004) obtiveram EUA para *Eucalyptus* em torno de 3 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O para uma parcela não irrigada e 4 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O para uma parcela irrigada, com precipitação de 1.770 mm e idade de um ano. Em estudos de Carneiro *et al.* (2004), foram verificados valores da EUA em híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de 14 meses variando entre 1,40 e 7,49 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O durante o período úmido, e de 1,05 e 6,41 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O, para os tratamentos irrigado e não irrigado, respectivamente.

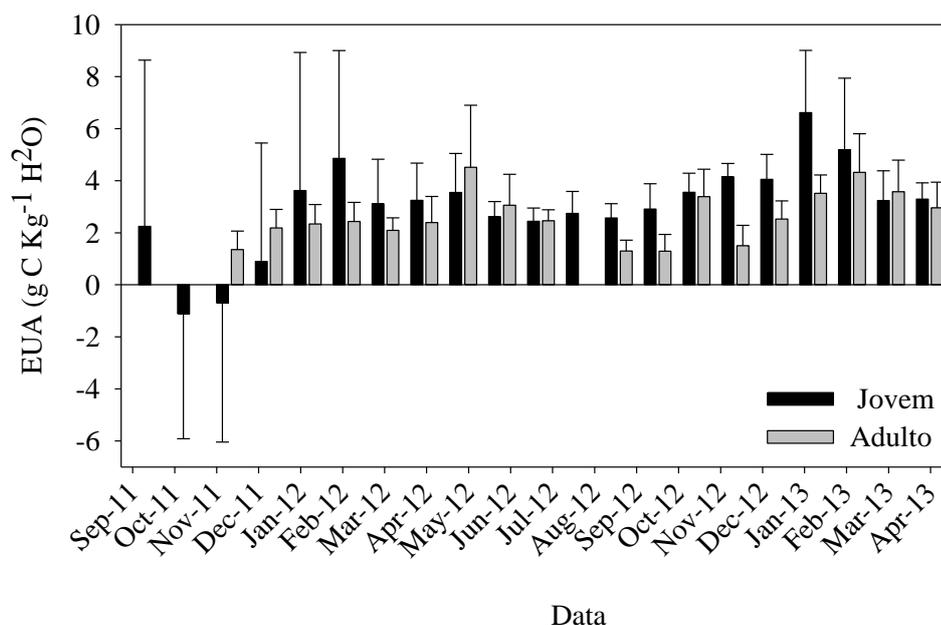


Figura 11. Eficiência do uso da água (EUA) em plantios jovens e adultos de eucalipto.

Verifica-se uma correlação entre os dados de GPP e ETR diários nos plantios (Figura 12), com coeficiente angular positivo, expressando a relação positiva entre as trocas de CO<sub>2</sub> e vapor de água nas plantas de eucalipto.

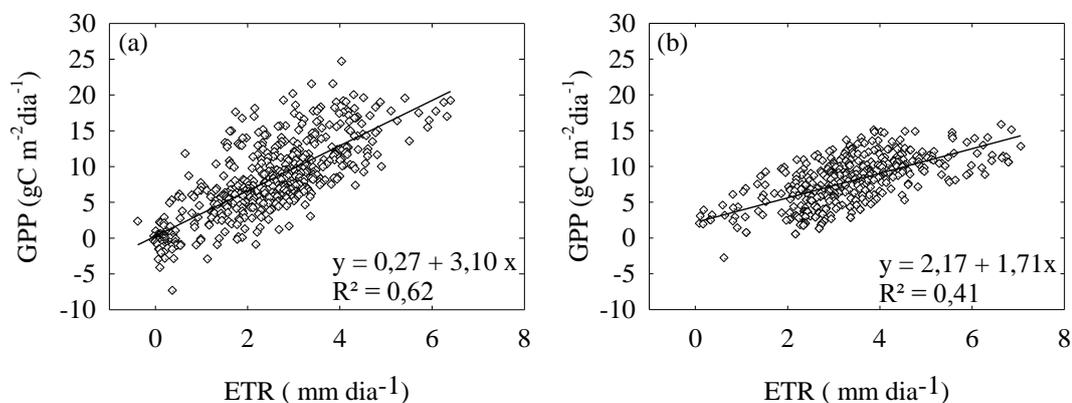


Figura 12. Dispersão dos dados de produção primária bruta (GPP) e evapotranspiração real (ETR) em plantios jovens (a) e adultos (b) de eucalipto.

#### 4. Conclusões

A incorporação carbono inicia-se próximo a zero, quando o plantio é estabelecido e tende a aumentar em taxas superiores comparadas ao adulto.

A resposta da planta ao clima é evidenciada no incremento do fluxo de CO<sub>2</sub> e água e do IAF nos períodos onde ocorreram maiores disponibilidades hídrica e

radiação solar na faixa fotossinteticamente ativa. Também foram observadas maiores eficiências de uso da água nesta época em ambos estádios de crescimento (jovem e adulto), em relação à estação seca.

O fechamento do balanço de energia ocorreu de forma satisfatória indicando boas medidas do sistema EC. Dentre os fluxos particionados, o fluxo de calor latente (L) é aquele que utiliza a maior porção do saldo de radiação (Rn) disponível à planta e alcança a maior relação L/Rn nos plantios adultos em épocas chuvosas.

## 5. Referências Bibliográficas

Abraf – Associação Brasileira Florestal. *Anuário Estatístico da ABRAF 2012 -Ano Base 2011*. <http://www.abraflor.org.br/>. Acessado em 15 de maio de 2013.

Almeida, A.C; Soares, J.V. Comparison of water use in *Eucalyptus grandis* plantations and Atlantic Rainforest in eastern coast of Brazil. *Revista Árvore*, v. 27, p. 159-170, 2003.

ARRUDA, J. C. *Estudo do fechamento do balanço de energia pelo método de covariância de vórtices turbulentos em uma floresta de transição em Mato Grosso*. 134 f. 2011. Universidade federal do Mato Grosso.

Baldocchi D. Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, v. 56, p. 1–26, 2008.

Baldocchi D., Hicks B.B. & Meyers T.P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, v. 69, p. 1331-1340, 1988.

Baldocchi, D., Finnigan, J., Wilson, K., Paw U, K.T., Falge, E. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Bound.-Lay. Meteorol.*, v. 96, p. 257–291, 2000.

BARROS, N. F. ; Barros, Nairam Felix ; NEVES, Julio Cesar Lima ; Novais, Roberto Ferreira ; Silva, Ivo Ribeiro ; Alley, Mark . Micronutrient Soil-Test Levels and Eucalyptus Foliar Contents. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 42, p. 475-488, 2011.

Biogeochemistry, Chapter 7 in: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, The IPCC Fourth Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge. 2007.

Carneiro, R. L. C.; Ribeiro, A.; Huaman, C. A. M.; Leite, F. P.; Sedyama, G. C.; Barros, N. F. Consumo de água em plantios de eucalipto - Parte 1: Determinação da

condutância estomática em tratamentos irrigados e não irrigados. *Revista Árvore*, v. 32, p. 1-10, 2008.

Cowan I.R. & Farquhar G.D. (1977) Stomatal Function in Relation to Leaf Metabolism 7 and Environment. In: Integration of activity in the higher plant (ed D.H. 8 Jennings), p. 471-505. Cambridge University Press, Cambridge.

Cunha, A.R.; Escobedo, J.F.; Klosowski, E.S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, n. 6, p.735-743, 2002.

Rocha, H. R., et al. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil, *J. Geophys. Res.*, v. 114, n. G1, 2009.

Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, Ph. Ciais, P. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy, X. Zhang. Couplings Between Changes in the Climate System and Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, J., 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, v. 263, p. 185–189, 2007.

Dovey, S.B.; Du Toit, B. Calibration of LAI-2000 canopy analyser with leaf area index in a young eucalypt stand. *Trees*, v. 20, p. 273–277, 2006.

Embrapa - Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. Cultivo do Eucalipto, 2003. Disponível em: [http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/01\\_01\\_historico.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/01_01_historico.htm). Acesso em: 27/07/2012.

Eugster, W., Rouse, W., Pielke Sr., R.A., McFadden, J.P., Baldocchi, D., Kittel, D., Chapin III, T.G.F., Liston, F.S., Vidale, G.E., Vaganov, P.L., Chambers, E.S. Land-atmosphere energy exchange in Arctic tundra and boreal forest: available data and feedbacks to climate. *Global Change Biol.*, v. 6, p. 84–115, 2000.

Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grunwald, T., Hollinger, D., Jensen, N.O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Lai, C.T., Law, B.E., Meyers, T., Moncrieff, H., Moors, E., Munger, J.W., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agric. Forest Meteorol.*, v. 107, p. 43–69, 2001.

Falge, E., Tenhunen, J., Baldocchi, D., Aubinet, M., Bakwin, P., Berbigier, P., Bernhofer, C., Bonnefond, J-M., Burba, G., Clement, R., Davis, K., Elbers, J., Falk, M., Goldstein, A., Grelle, A., Granier, A., Gruenwald, T., Guomundsson, J., Hollinger, D., Janssens, I., Keronen, P., Kowalski, A., Katul, G., Law, B., Malhi, Y., Meyers, T., Monson, R., Moors, E., Munger, J., Oechel, W., Kyaw Tha Paw, U., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Thorgeirsson, H., Tirone, G., Turnipseed, A., Wilson, K., Wofsy, S. Phase and amplitude of ecosystem carbon

release and uptake potential as derived from FLUXNET measurements. *Agric. For. Meteorol.*, v. 113, p. 75–95, 2002.

Ferreira, Maria A. ; Alfenas, Acelino C. ; Binoti, Daniel H.B. ; Machado, Patrícia S. ; Mounteer, Ann H. . Slow sand filtration eradicates eucalypt clonal nursery plant pathogens from recycled irrigation water in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, v. 37, p. 319-325, 2012.

Fibria. Monitoramento de Flora e Fauna. Relatório interno.88 p. 2011.

Gough, C. M., C. S. Vogel, H. P. Schmid, H. B. Su, and P. S. Curtis, Multi-year convergence of biometric and meteorological estimates of forest carbon storage, *Agric. For. Meteorol.*, v. 148, p. 158 – 170, 2008.

Gu L., Baldocchi D. D.; Wofsy S. C.; Munger J. W.; Michalsky J. J, Urbanski S. P, Boden T. A. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: enhanced photosynthesis. *Science*, v. 299, p. 2035–2038, 2003.

Huete, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 195 – 213, 2002.

Hutley L. B., Leuning R., Beringer J. & Cleugh H. A. The utility of the eddy covariance techniques as a tool in carbon accounting: tropical savanna as a case study. *Australian Journal of Botany*, v. 53, p. 663–675, 2005.

Ippc, Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

Justice, D. H.; Salomonson, V.; Privette, J.; Riggs, G.; Strahler, A.; Lucht, R.; Myneni, R.; Knjazihhin, Y.; Running, S.; Nemani, R.; Vermote, E.; Townshend, J.; Defries, R.; Roy, D.; Wan, Z.; Huete, A.; Van Leeuwen, R.; Wolfe, R.; Giglio, L.; Muller, J.P.; Lewis, P.; Barnsley, M. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.36, p. 1228 – 1249, 1998.

Lasslop, G., Reichstein, M., Papale, D., Richardson, A. D., Arneth, A., Barr, A., Stoy, P., and Wohlfahrt, G.: Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation, *Glob. Change Biol.*, v. 16, p. 187–208, 2010.

Leuning R, Moncrieff J. Eddy covariance CO<sub>2</sub> flux measurements using open and closed path CO<sub>2</sub> analysers: Corrections for analyser water vapour sensitivity and damping of fluctuations in air sampling tubes. *Boundary Layer Meteorol.*, v. 53, p. 63-76, 1990.

Lloyd J.; Taylor J. A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, v. 8, p. 315–323, 1994.

McMillen, R.T. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Bound.-Lay. Meteorol.*, v. 43, p. 231–245, 1988.

Meteorology, in press, -, doi:10.1016/j.agrformet.2013.04.027, 2013.

Mielke, M. S.; Oliva, M. A.; Barros, Penchel, R. M N. F.; Martinez, F. B.; Fonseca, S.; Almeida, C. A.. Leaf gas exchange in a clonal eucalypt plantation as related to moisture, leaf water potential and microclimate variables. *Trees*, v. 14, p. 263-270, 1999.

Moncrieff, J.B., Malhi, Y., Leuning, R. The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water. *Global Change Biology*, v. 2, p. 231–240, 1996.

Monteith, J.L. Evaporation and environment. *Symp.Soc. Exp. Biol.*, v. 19, p. 205–234, 1965.

Moore, C. J.; Fisch, G. Estimating heat storage in Amazonian tropical forests. *Agric. Forest Meteorol.* v. 38, p. 147-169, 1986 Cattelan, A. J.; Vidor, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função de variações ambientais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo: Campinas*, v. 14, p. 133-142, 1990.

Oliveira, I.A.; Lima, J.R.S.; Silva, I.F.; Antonino, A.C.D.; Gouveia Neto, G.; Lira, C.A.B. Balanço de energia em mamona cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 4, n. 2, p. 185-191, 2009.

Pan Y, Birdsey RA, Fang J et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, v. 14, p. 1–11, 2011.

Pezzopane, J.R.M; Pedro Júnior, M.J. Balanço de energia em vinhedo de 'Niagara rosada'. *Bragantia*, v. 62, n. 1, p. 155-161, 2003.

Randomiljac, A. M.; Mcconb, J. A; Pate, J. S. Gas exchange and water relations of the root hemmi-parasite *Santalum album* L. In association with legume and non-legume-hosts. *Annals of Botany*, v. 83, p. 215-224, 1999.

Reichstein M, Falge E, Baldocchi D et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, v. 11, p. 1424–1439, 2005.

Richardson, A.D., Black, T.A., Ciais, P., Delbart, N., Friedl, M.A., Gobron, N., Hollinger, D.Y., Kutsch, W.L., Longdoz, B., Luysaert, S., Migliavacca, M., Montagnani, L., Munger, J.W., Moors, E., Piao, S.L., Rebmann, C., Reichstein, M., Saigusa, N., Tomelleri, E., Vargas, R., Varlagin, A.. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 365, n. 1555, p. 3227–3246, 2010.

Rody et al. Avaliação das trocas dos fluxos gasosos em plantios de eucalipto na região centro-oeste do Brasil. Dados não publicados. 2013b.

Sacks, W. J., D. S. Schimel, R. K. Monson, and B. H. Braswell, Model-data synthesis of diurnal and seasonal CO<sub>2</sub> fluxes at Niwot Ridge, Colorado, *Global Change Biol.*, v. 12, p. 240 – 259, 2006.

Schotanus, P., Nieuwstadt, F. T. M. and De Bruin, H. A. R. ‘Temperature Measurement with a Sonic Anemometer and its Application to Heat and Moisture Fluctuations’, *Boundary-Layer Meteorol.*, v. 26, 81–93, 1983.

Stape, J. L., Ryan, M., Binkley, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. *For. Ecol. Manage.*; v. 193, p. 219–234, 2004.

Tanaka, H., Hiyama, T., Kobayashi, N., Yabuki, H., Ishii, Y., Desyatkin, R. V., Maximov, T. C., and Ohta, T.: Energy balance and its closure over a young larch forest in eastern Siberia, *Agric. For. Meteorol.*, v. 148, n. 1954–1967, 2008.

Teixeira, A.H. de C; Azevedo, P.V. de; Silva, B.B. da; Soares, J.M. Balanço de energia na cultura da videira, cv. “Itália”. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, n.2, p.137-141, 1997.

Twine, T. E.; Kustas, W. P.; Norman, J. M.; Cook, D. R.; Houser, P. R.; Meyers, T. P.; Prueger, J. H.; Starks, P. J.; Wesely, M. L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 103, p. 279-300, 2000.

Vickers, D., Irvine, J., Martin, J. G. and Law, B. E. Nocturnal subcanopy flow regimes and missing carbon dioxide. *Agric. Forest Meteorol.*, v. 152, p. 101-108, 2011.

Wang M., Liu Y.Q., Hao Z.Q., Wang Y.S. Ecosystem respiration in broad leaved-Korean pine forest of Changbai Mountain, China. *Chin. J. Appl. Ecol.*, v. 17, p. 1789-1795, 2006.

Webb, E.K., Pearman, G.I., Leuning, R. Correction of the flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, v. 106, p. 85–100, 1980.

Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Gelle, A., Ibrom, A., Law, B.E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R., Verma, S. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. Forest Meteorol.* v. 113, p. 223–243, 2002.

Y. Lin; G. X. Wang, J. Y. Guo and X. Y. Sun. Quantifying evapotranspiration and its components in a coniferous subalpine forest in Southwest China. *Hydrol. Process.*, v. 26, p. 3032–3040, 2012.

Yukio Yasuda; Takeshi Saito; Daisuke Hoshino; Kenji Ono; Yoshikazu Ohtani; Yasuko Mizoguchi; Takeshi Morisawa. Carbon balance in a cool-temperate deciduous forest in northern Japan: seasonal and interannual variations, and environmental controls of its annual balance. *J For Res*, v.17, p. 253–267, 2012.

## CONCLUSÕES GERAIS

- Com os diversos componentes e processos fisiológicos mensurados, verificou-se que os plantios de eucaliptos responderam com aumentos de fluxos de vapor d'água e assimilação de carbono em épocas com maiores disponibilidades hídricas nas idades avaliadas.
- Verifica-se uma tendência dos plantios jovens a realizarem maiores trocas gasosas, provavelmente devido à fase de crescimento acelerada, observada nas maiores variações de biomassa. Nesta idade, se observa maior eficiência do uso da água em condições de restrição hídrica, fato relevante para explicar a elevada taxa de crescimento e manutenção da biossíntese evitando a perda excessiva de água.
- No efluxo do carbono do solo para o ambiente foram observadas boas correlações com a temperatura do solo.
- Em uma análise por órgãos da planta, os fluxos respiratórios do plantio jovem apresentaram-se em geral maiores nas folhas e raízes e reduzidos nos troncos, quando comparados à idade adulta, sendo que para ambas idades, a folha foi o órgão com maior respiração em relação aos demais.
- O  $\delta^{13}\text{C}$  da respiração foi mais enriquecido quando as árvores encontravam-se em condição de estresses hídricos em períodos de seca.
- O fechamento do balanço de energia ocorreu de forma satisfatória indicando boas medidas do sistema EC. Dentre os fluxos particionados, o fluxo de calor latente (L) é aquele que utiliza a maior porção do saldo de radiação (Rn) disponível a planta e alcança maior relação L/Rn nos plantios adultos em épocas chuvosas.