

JOSÉ DARLON NASCIMENTO ALVES

**PARTIÇÃO DO FLUXO DE CO₂ E EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA EM
PASTAGEM NATURAL**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A474p
2017
Alves, José Darlon Nascimento, 1993-
Partição do fluxo de CO₂ e eficiência do uso de água em
pastagem natural / José Darlon Nascimento Alves. – Viçosa,
MG, 2017.
ix, 47f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Eduardo Alvarez Santos.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Pastagens. 2. Micrometeorologia. 3. Carbono. 4. Água -
Uso. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em
Meteorologia Aplicada. II. Título.

CDD 22 ed. 633.202

JOSÉ DARLON NASCIMENTO ALVES

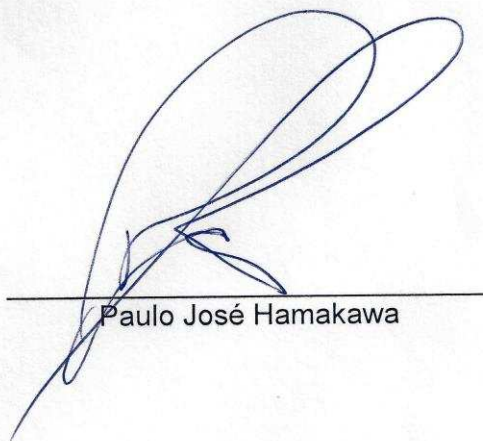
**PARTIÇÃO DO FLUXO DE CO₂ E EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA
EM PASTAGEM NATURAL**

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

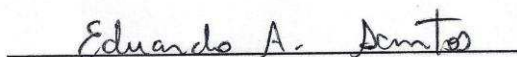
APROVADA: 22 de fevereiro de 2017.



Milton Edgar Pereira Flores



Paulo José Hamakawa



Eduardo Alvarez Santos
(Orientador)

DEDICO

À minha mãe Vanda Maria e ao meu pai José Alves.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por permitir a concretização dessa etapa.

Agradeço a toda minha família, principalmente aos meus pais José de Arimatéia Alves e Vanda Maria Pontes do Nascimento, irmão Michel Alves, Tia Edleuza Alves, avó Terezinha Alves e prima Tayssa Franco, que sempre me incentivaram apesar da distância.

Quero agradecer ao meu Orientador Eduardo Alvarez Santos, pela paciência e ajuda durante o Mestrado e também ao co-orientador Aristides Ribeiro, pela atenção e disponibilidade do local para desenvolver as atividades durante esses anos.

Agradeço a todos os amigos do grupo BIOMODEL, em especial, Mariana Reis, Marshall Santos, Hugo Santos e Elias José, pelo apoio e colaboração durante essa jornada.

Obrigado aos amigos de Capitão Poço - PA, em especial a Gabriela Muniz, Shirlene Oliveira, Wendel Kaian, Francisco de Assis, Leonardo Perote, Antonio Silvandro, Morieli Ladislau e Giseli Sampaio pelo incentivo e ajuda.

Obrigado também aos amigos que fiz em Viçosa – MG, em especial a Andressa Cursi, Alexandre Faria, Dona Cida, Thiago Sales, Vinicius Almeida e Aly Camilo, pelo convívio e contribuição.

Não esquecendo de agradecer aos professores da Graduação e Mestrado, pelo conhecimento compartilhado.

À Universidade Federal de Viçosa e todo o seu corpo de servidores efetivos e terceirizados, em especial à Graça Freitas, que sempre estiveram à disposição, trabalhando para formar profissionais qualificados.

À Kansas States University e todas as pessoas envolvidas pela realização do experimento.

Ao CNPQ, pela concessão da bolsa, que possibilitou a conclusão dos estudos.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram durante a minha jornada.

BIOGRAFIA

JOSÉ DARLON NASCIMENTO ALVES, filho de José de Arimatéia Alves e Vanda Maria Pontes do Nascimento, nasceu em 19 de Janeiro de 1993, na cidade de São Miguel do Guamá – PA. Em 2014, concluiu o curso de graduação em Agronomia na Universidade Federal Rural da Amazônia Campus de Capitão Poço - PA. A partir de 2015, iniciou o curso de Mestrado em Meteorologia Aplicada na Universidade Federal de Viçosa.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1. REVISÃO DE LITERATURA	5
1.1 Covariância de vórtices turbulentos	5
1.2 Partição do fluxo de CO ₂	7
1.3 Eficiência do uso de água em pastagens naturais	10
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11
CAPÍTULO 2. PARTIÇÃO DO FLUXO LÍQUIDO DE CO ₂ EM FOTOSSÍNTESE E RESPIRAÇÃO E EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA EM ECOSSISTEMA DE PASTAGEM	23
1. INTRODUÇÃO	23
2 MATERIAL E MÉTODOS	25
2.1 Sítio experimental.....	25
2.2 Medida dos fluxos	26
2.3 Separação dos componentes do fluxo líquido de CO ₂	28
2.4 Eficiência do uso de água	29
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
3.1 Estimativa da respiração do ecossistema diurna	30
3.2 Caracterização meteorológica do experimento	31
3.3 Separação da troca líquida do ecossistema em fotossíntese e respiração do ecossistema	34
3.4 Evapotranspiração e eficiência do uso de água	37
4 CONCLUSÕES	40
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos de estimativa da respiração média noturna do ecossistema de pastagem em função da temperatura e umidade do solo e coeficientes de temperatura. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.	30
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pastagem natural da área experimental. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.....	26
Figura 2: Torre micrometeorológica instalada na área de pastagem natural... ..	27
Figura 3: Temperatura (A) e umidade relativa do ar (B), medidas a cada 30 minutos, na pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.....	32
Figura 4: Precipitação diária acumulada na pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.. ..	32
Figura 5: Temperatura (A) e umidade do solo (B) em pastagem natural medidas a uma profundidade de 10 cm a cada 30 minutos. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.....	33
Figura 6: Calor sensível (H) em pastagem natural a cada 30 minutos. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.....	33
Figura 7: Troca líquida do ecossistema (NEE) a cada 30 minutos em pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.....	34
Figura 8: Partição do fluxo líquido CO ₂ diário em fotossíntese (GPP) e respiração do ecossistema (Reco) em pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.	36
Figura 9: Evapotranspiração (ET) a cada 30 minutos em pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.....	37
Figura 10: Eficiência do uso de água (EUA) diária em pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.	39

RESUMO

ALVES, José Darlon Nascimento, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Partição do fluxo de CO₂ e eficiência do uso de água em pastagem natural**. Orientador: Eduardo Alvarez Santos. Coorientador: Aristides Ribeiro.

As pastagens naturais são importantes para os ciclos de água e carbono no planeta, contribuindo para o armazenamento de matéria orgânica no solo, alimentação animal e para a diversificação da fauna e flora. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi particionar o fluxo de carbono e quantificar a eficiência do uso de água em pastagem natural por meio da técnica de covariância de vórtices turbulentos. O sítio experimental está localizado em uma área de pastagem natural com aproximadamente 3.487 hectares, na Universidade do Estado do Kansas, em Manhattan, Kansas, Estados Unidos. Foram analisados dados de fluxos obtidos durante o período de maio a outubro de 2016. As medições dos fluxos de CO₂ e fluxo de calor latente foram realizadas por meio da técnica da covariância de vórtices turbulentos. As medidas de velocidade do vento, concentração de CO₂, calor sensível e vapor d'água ocorreram a uma frequência de 20 Hz utilizando-se um sistema de aquisição de dados. Os dados brutos foram processados pelo software EddyPro 6.0. Foi realizada a estimativa da respiração durante o dia, a partir da relação não linear entre a troca líquida do ecossistema durante a noite e a temperatura e umidade do solo noturna, a cada dois meses (maio-junho, julho-agosto, setembro-outubro), em que foi obtida melhor relação apenas com a temperatura do solo. Em seguida, foi feita a separação do fluxo de CO₂ em fotossíntese (GPP) e respiração do ecossistema (Reco) e análise da eficiência do uso de água durante a estação de crescimento. Observou-se variação de NEE na pastagem entre $-30 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Ao realizar a partição do fluxo de CO₂ do ecossistema, verificou-se maior intervalo de incerteza nos meses de julho e agosto, em decorrência do baixo R² encontrado, porém foram obtidas maiores taxas de fotossíntese em relação à respiração do ecossistema em todos os meses analisados. O valor médio de eficiência do uso de água do ano de 2016 foi de 3,1 gC/kg H₂O. Durante o experimento, o ecossistema atuou como sumidouro de carbono, o que refletiu em aumento de biomassa. Além disso, as atividades metabólicas e balanço de água são afetados diretamente pela temperatura do ar.

ABSTRACT

ALVES, José Darlon Nascimento, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, february, 2017. **Partitioning the CO₂ net flux into assimilation and respiration components and estimating water use efficiency in a grassland ecosystem.** Adviser: Eduardo Alvarez Santos. Co-adviser: Aristides Ribeiro.

Grasslands play an important role for water and carbon global cycles. Grasslands contribute to the storage of organic matter in the soil, animal feed and for biodiversity. The objective this study was to partition of the CO₂ net ecosystem exchange (NEE) and to quantify the use water use efficiency in grassland using the eddy covariance technique. The experimental site is located in a grassland ecosystem with an area of approximately 3,487 hectares at the Kansas State University in Manhattan, Kansas, United States. The flux data obtained were analyzed during the period from May to October 2016. The measurements of CO₂ and latent heat fluxes were measured using the eddy covariance technique. Measurements of wind velocity orthogonal components, CO₂ and water vapor concentration were taken at a frequency of 20 Hz using a datalogger. The raw files were processed using the EddyPro 6.0 software. Estimates of daytime respiration were performed using the nonlinear relationship between nighttime net ecosystem exchange and soil temperature for bi-monthly periods (May-June, July-August, September-October). Then, the net ecosystem exchange was separated into gross primary productivity (GPP) and ecosystem respiration (Reco). The water use efficiency was calculated for the growing season. The values of NEE in the grassland varied from -30 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ to 15 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The flux partitioning uncertainties were larger for the months of July and August, due to the low R² found. The average value of water use efficiency was 3,1 gC/kg H₂O. Thus, that ecosystem acted as a carbon sink, which reflected an increase in biomass. In addition, metabolic activities and water balance are directly affected by air temperature.

INTRODUÇÃO GERAL

O aquecimento global e as mudanças climáticas globais têm sido considerados consequências diretas do aumento concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, especialmente de gás carbônico (CO₂) (IPCC, 2007; JIANG et al., 2013). Com isso, várias pesquisas vêm buscando compreender o potencial de sequestro e emissão de carbono em diferentes agroecossistemas. Entre eles, as pastagens naturais que apresentam significativa participação no ciclo do carbono.

As pastagens naturais são amplamente distribuídas na litosfera. Sendo encontradas na Ásia Central, África Subsaariana e Austral, América do Norte e do Sul, Austrália e Nova Zelândia. Há também áreas significativas de pastagens naturais na Europa (O'MARA, 2012).

Estes ecossistemas são importantes para o balanço de água e carbono no planeta, contribuindo para a formação de matéria orgânica no solo, alimentação animal e para a diversificação da fauna e flora. Além disso, esses ecossistemas vêm ganhando destaque nos últimos anos por causa do seu potencial de sequestro de gás carbônico da atmosfera (SENAPATI et al., 2016), devido à característica das gramíneas de promover acúmulo de biomassa em função do rápido crescimento da parte aérea e do sistema radicular. Estima-se que até 2030, esse ecossistema sequestre, ao nível global, entre 0,2 e 0,8 Gt CO₂ ano⁻¹ do carbono orgânico no solo (SMITH et al., 2008).

A ampla distribuição de pastagens em diferentes condições climáticas aumenta a complexidade da medição e modelagem de fluxos de carbono e energia. No entanto, a compreensão da vulnerabilidade dos ecossistemas às mudanças ambientais é de extrema importância (BURKETT et al., 2005). O fluxo líquido de CO₂ no ecossistema (NEE) permite analisar e quantificar a dinâmica do carbono entre a vegetação, o solo e a atmosfera ao longo do tempo, o que permite compreender

como os ecossistemas respondem à diferentes condições ambientais (LOEW, 2014; BALDOCCHI; STURTEVANT, 2015).

A covariância de vórtices turbulentos é uma técnica micrometeorológica que se baseia nos princípios de turbulência na camada limite atmosférica que tem demonstrado ser uma ferramenta promissora para a quantificação direta de fluxos de energia, água e CO₂ nesses ecossistemas, com menor frequência de erros de medição (BALDOCCHI, 2003).

A técnica de covariância de vórtices turbulentos vem sendo amplamente utilizada para a análise de CO₂ e vapor de água, em diferentes ambientes, como florestas nativas (XIE et al., 2016), culturas anuais (CABRAL et al., 2013), florestas plantadas (CABRAL et al., 2011) e pastagem natural (BRÜMMER et al., 2012). Esta técnica tem mostrado resultados satisfatórios em medições de fluxos de carbono e água em diferentes ambientes.

Uma melhor compreensão dos fluxos de carbono em pastagens naturais é necessária para determinar seu potencial papel na mitigação ou contribuição para o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera e mudanças globais, podendo servir como parâmetro em modelos de mudanças climáticas (GILMANOV et al., 2005).

A separação dos componentes do NEE em produção primária bruta (GPP) e respiração do ecossistema (R_{eco}) é necessária para melhorar a compreensão das causas da variabilidade interanual da fixação de carbono, e para melhoria de modelos de carbono baseados em processos biofísicos. Estabelecer relações entre a produção primária bruta (GPP) e a respiração do ecossistema (R_{eco}) é importante para prever a influência das alterações climáticas no sequestro futuro de carbono em ecossistemas (VICKERS et al., 2009).

A produção primária bruta é a taxa de fixação de carbono ou assimilação bruta por unidade da área da superfície do solo e tempo (TURNER et al., 2006); e é uma medida de fotossíntese e representa o principal veículo de fluxo de carbono a partir da atmosfera para a superfície terrestre (JIANG et al., 2013).

A respiração do ecossistema é a liberação de CO₂ para a atmosfera, composta pela respiração autotrófica (vegetação), responsável pelo crescimento e manutenção das plantas e pela respiração heterotrófica proveniente da atividade microbiana do solo (LUYSSAERT et al., 2007; CHEN et al., 2014).

Outra variável de grande importância em ecossistemas é a evapotranspiração, pois através do seu conhecimento pode-se determinar e analisar a eficiência do uso de água (EUA). O fluxo de vapor de água para a atmosfera é um importante componente para avaliação do balanço de energia em uma determinada região e este é condicionado pela partição da energia disponível, pela disponibilidade de água no solo, pelas propriedades físicas da superfície, pela umidade do ar adjacente à superfície, pelas características dinâmicas da camada atmosférica justaposta àquela superfície (OLIVEIRA et al., 2006).

A eficiência do uso de água é um importante índice que representa a relação entre os ciclos do carbono e da água (STEDUTO et al. 2007). A compreensão da sazonalidade desta variável pode ampliar o conhecimento sobre a relação entre os ciclos de carbono e água, durante o crescimento da vegetação e a dinâmica do uso da água frente as diferentes pressões ambientais, como a seca prolongada (ZHU et al., 2014). Além de servir como um fator para modelagem da interação biosfera-atmosfera.

O objetivo do trabalho foi particionar o fluxo líquido de carbono em fotossíntese e respiração do ecossistema e quantificar a eficiência do uso de água em pastagem natural por meio da técnica de covariância de vórtices turbulentos.

CAPÍTULO 1

1 REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Covariância de vórtices turbulentos

A covariância de vórtices turbulentos é uma técnica micrometeorológica que vem sendo amplamente utilizado para a medida de fluxos de energia, vapor de água e de CO₂ em diferentes ecossistemas terrestres, promovendo melhor entendimento dos processos biofísicos responsáveis pela dinâmica destes fluxos e a sua variação espacial e temporal (BALDOCCHI, 2003).

Esse método se baseia nas condições turbulentas ou instáveis da atmosfera, em que ocorre a troca de massa e energia entre a vegetação e a camada limite atmosférica. A metodologia tem como princípio as flutuações das concentrações (covariância) de gases, energia e na velocidade vertical do vento (BALDOCCHI, 2003; BURBA; ANDERSON, 2010).

Para uso dessa técnica são necessários equipamentos eletrônicos instalados em uma torre micrometeorológica. Entre os equipamentos utilizados podem ser citados o anemômetro sônico, para medição das três componentes vetoriais do vento e o analisador de gás aberto ou fechado, para medições do vapor de água, CO₂ e metano (BURBA; ANDERSON, 2010).

Thomas et al. (2008) ressaltam que a covariância de vórtices turbulentos é comumente utilizada em diversas redes de observação de superfície atmosférica para medida de fluxos de energia, vapor de água e CO₂ (como por exemplo, AmeriFlux, CarboEurope, Asiaflux, Programa Carbono Canadense), que cobrem uma grande variedade de ecossistemas, tipos climáticos e de vegetação, devido ao raio de alcance e exatidão dessa técnica.

A covariância de vórtices turbulentos requer algumas condições de contorno para melhor exatidão das variáveis medidas, entre elas, condições mínimas de

turbulência da atmosfera, que podem ser analisadas por meio da velocidade de fricção (u^*), homogeneidade da vegetação, bordadura mínima que evite a influência das condições meteorológicas de outros locais e instalação da torre micrometeorológica dentro da camada limite turbulenta (AUBINET et al., 2012; BURBA; ANDERSON, 2010).

O valor da velocidade de fricção é função das características da vegetação do local monitorado, como área foliar e altura do dossel vegetativo, características físicas do terreno, condições meteorológicas e climatológicas da região (GU et al., 2005).

Outra condição de contorno da covariância de vórtices turbulentos é a homogeneidade da vegetação, ou seja, não é recomendado ser implantado em locais de transição entre ecossistemas, pois existe mudanças na rugosidade, temperatura e umidade do ar. Por isso, deve-se ter uma bordadura adequada para minimizar essas influências.

Durante a instalação da torre micrometeorológica é importante verificar o nivelamento do terreno, a altura do dossel vegetativo e a distância mínima entre os equipamentos para evitar erros de medição.

O não cumprimento dessas condições de contorno possivelmente irá causar erros sistemáticos em medições de fluxos alterando os valores acumulados em escala diária e mensal, podendo comprometer a qualidade das medidas de fluxo de carbono e vapor de água (LEUNING et al., 2012).

Peltola et al. (2015) analisaram a variabilidade espacial do fluxo de gás metano (CH_4) por meio da técnica de covariância de vórtices turbulentos, com uso de cinco torres em 3 alturas diferentes (6, 6, 6, 20 e 60 m) e concluíram que houve diferença considerável nas medições de fluxo de CH_4 , em que as torres com maiores

alturas apresentaram maiores valores de medição, fato que possivelmente esteve correlacionado ao *footprint* (raio de alcance do sensor) e altura dentro da camada limite turbulenta.

Para as medições noturnas dos fluxos, em especial o CO₂, são necessários alguns cuidados, como adoção de um valor mínimo de velocidade de fricção e índices de qualidades de dados, para que não ocorram medições subestimadas ou superestimadas. Durante a noite, a turbulência da atmosfera é reduzida (BARR et al., 2013), em que ocorre menor difusão de CO₂ dentro do dossel vegetativo.

Nas medições noturnas, em que a instabilidade da atmosfera é reduzida, usualmente, utiliza-se a velocidade de fricção a partir de 0,15 m s⁻¹, para a coleta dos fluxos, pois minimizariam os erros de medição (BRUNSELL et al., 2014; TONG et al., 2014; ZHANG et al., 2016). Baldocchi (2003) sugere o intervalo entre 0,1 a 0,6 m s⁻¹ para a velocidade de fricção em medições noturnas, pois apresentam resultados mais precisos, devido maior qualidade dos dados.

Dessa forma, a covariância de vórtices turbulentos possui algumas limitações que devem ser compreendidas, pois maior será a capacidade de discriminação das medições de fluxos de CO₂ e vapor d'água, devido à diminuição de erros, principalmente durante o período noturno.

1.2 Partição do fluxo de CO₂

O balanço dos fluxos de CO₂ entre a atmosfera e vegetação, ou seja, a troca líquida do ecossistema (NEE) indica a tendência de um ecossistema armazenar ou liberar CO₂ para atmosfera.

Por convenção, os valores negativos de NEE representam uma absorção líquida de dióxido de carbono pelo ecossistema a partir da atmosfera e os valores

positivos ocorrem quando o ecossistema libera carbono para a atmosfera (ZHANG et al., 2010).

No ecossistema, a respiração do solo é resultado da atividade respiratória das raízes e mineralização da matéria orgânica pela biota do solo (LUO; ZHOU, 2006). Com isso, o isolamento dos componentes dos fluxos possibilita avaliar a resposta da planta e dos organismos do solo frente às diferentes condições ambientais, servindo como embasamento para previsões de cenários de mudanças climáticas no futuro.

Compreender como a fotossíntese bruta (GPP) e a respiração ecossistema (Reco) respondem às variáveis ambientais e como estes componentes do fluxo de carbono variam diária, sazonal, anual e interanualmente são pré-requisitos para a compreensão das variáveis que controlam e modulam o NEE dos ecossistemas (LAW et al., 1999).

A separação dos componentes dos fluxos de CO₂ da vegetação e do solo, pode ser realizada pelas técnicas não-isotópicas ou isotópicas. As técnicas não-isotópicas são caracterizadas por medidas diretas do fluxo líquido de CO₂, em que a separação dos seus componentes se dá a partir de relações empíricas com base em inferências de medições de trocas gasosas da folha, do solo ou da NEE noturna. Enquanto a técnica isotópica consiste em identificar e analisar os componentes fotossintéticos e respiratórios da troca líquida do ecossistema, a partir das distintas assinaturas isotópicas do carbono (WEHR; SALESKA 2015).

Entre os métodos não isotópicos destacam-se: técnicas de comparação do solo com e sem vegetação, sombreamento ou recorte da parte aérea das plantas em pastagens; e modelos empíricos baseados na relação entre a biomassa radicular e as quantidades de CO₂ produzidos pelas raízes e pelos microrganismos. São

técnicas que possuem como principais vantagens a simplicidade e emprego em vários ecossistemas (KUZYAKOV, 2006).

Outras metodologias não-isotópicas são utilizadas para a partição do fluxo de carbono. Reichstein et al. (2005) indicam a estimativa da respiração do ecossistema a partir de dados noturnos de NEE. Outra abordagem é a extrapolação da respiração a partir da curva de luz a partir de determinado dia. Esse método não leva em consideração a influência da temperatura e do déficit de pressão de vapor, incluindo erros na respiração do ecossistema (DESAI et al., 2008).

Lloyd e Taylor (1994) também desenvolveram um método de determinação da respiração do ecossistema, baseado em um coeficiente de temperatura (Q_{10}), caracterizado como o aumento da respiração com incremento a cada 10°C e na respiração de referência do solo a 10 °C (R_{10}) estimados pelo modelo de regressão linear.

As técnicas isotópicas baseiam-se na proporção de isótopos de carbono $^{14}\text{CO}_2$ e $^{13}\text{CO}_2$ na planta e na atmosfera, são consideradas mais complexas, porém oferecem maior precisão (KUZYAKOV, 2006).

Wehr e Saleska (2015) realizaram a partição da troca líquida do ecossistema nas componentes respiração do ecossistema e fotossíntese, por meio da técnica isotópica, em uma floresta temperada decídua, nos Estados Unidos, e concluíram que o método é eficaz na separação da assimilação e respiração, pois os erros de medição são minimizados. Assim, essa técnica é outra possibilidade no estudo dos componentes do fluxo de CO_2 .

Outra técnica utilizada é a diferença entre a proporção de ^{18}O originário do CO_2 do solo e das plantas. É avaliada a troca entre biosfera-atmosfera desse isótopo e, a partir disso, é realizada a análise da contribuição de cada fonte nos fluxos de

CO₂ e H₂O dos ecossistemas para a atmosfera (RILEY et al.,2003; SANTOS et al., 2014).

Santos et al. (2014) realizaram um estudo sobre a dinâmica temporal de isótopos estáveis de carbono e oxigênio em uma floresta decídua, no Canadá, e concluíram que a separação isotópica pode ser uma ferramenta promissora no particionamento do fluxo de CO₂ do ecossistema.

1.3 Eficiência do uso de água em pastagens naturais

Existem várias metodologias de determinação da eficiência do uso de água. Uma delas é a razão entre fotossíntese e a evapotranspiração, utilizada à nível de ecossistema (ZHANG et al., 2016), que também pode ser estimada com uso do fluxo de calor latente (BEER et al., 2009; BRUNSELL et al., 2014; TANG et al., 2016). Ao nível de planta, a eficiência do uso da água é calculada pela razão entre a fotossíntese e a transpiração (BEER et al., 2009).

As pastagens naturais desempenham um papel importante na troca de vapor de água e de energia entre a biosfera e a atmosfera, devido elas representarem cerca de um terço da área de vegetação natural na Terra (ADAMS et al., 1990). As pastagens por serem predominantemente compostas por plantas C₄ possuem maior eficiência do uso de água do que as plantas C₃, podendo ser de duas a três vezes mais eficientes, contribuindo para o maior desenvolvimento vegetativo (LOPES; LIMA, 2015).

A eficiência do uso de água (EUA) é um parâmetro chave que reflete em múltiplas funções do ecossistema. O que permite uma melhor compreensão de como a EUA varia de acordo com os fatores climáticos e dentro de diferentes biomas. Além disso, é útil para alcançar uma gestão sustentável dos recursos

hídricos e serviços ecossistêmicos no contexto da mudança global (GUO et al., 2010).

A compreensão do papel do clima sobre a vegetação, principalmente em relação aos processos de troca de energia é fundamental para prever como os ecossistemas irão responder às futuras perturbações ambientais. Assim, é essencial investigar os fluxos de vapor de água e processos de troca de energia em diferentes ecossistemas ao longo dos anos para elucidar os mecanismos que controlam o movimento da água, ciclos de carbono e outros processos do ecossistema (KRISHNAN et al., 2012).

A eficiência do uso de água varia conforme as condições meteorológicas e da vegetação. Dentre os fatores podem ser citados, conteúdo de água no solo, déficit de pressão de vapor, índice de área foliar e a concentração de CO₂ (ZHU et al., 2014).

Brümmer et al. (2012) ao analisarem a eficiência do uso de água em vários sítios em diferentes ecossistemas, compostos por florestas e pastagens naturais, obtiveram valores anuais na maioria dos sítios na faixa de 2,6-3,7 gC kg⁻¹ H₂O. Fatores como o clima, índice de área foliar e biomassa, associados a tipos funcionais de plantas, foram responsável pelos valores de EUA fora desta faixa.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J.M. FAURE, H. FAURE-DENARD, L. MCGLADE, J.M. WOODWARD, F.I. Increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present. **Nature**, Londres, v. 348, n. 12, p.711–714, 1990. <http://dx.doi.org/10.1038/348711a0>.

AUBINET, M., VESALA, T., PAPAIE, D. **Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis**. Springer Press. 2012. 270p.

BALDOCCHI, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, n. 4, p.479–492, 2003. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x>.

BALDOCCHI, D. STURTEVANT, C. CONTRIBUTORS, F. Does day and night sampling reduce spurious correlation between canopy photosynthesis and ecosystem respiration? **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 207, n. 7, p.117–126. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.010>.

BARR, A.G. RICHARDSON, A. D. HOLLINGER, D. Y. PAPAIE, D. ARAIN, M. A. BLACK, T. A. BOHRER, G. DRAGONI, D. FISCHER, M. L. GU, L. LAW, B. E. MARGOLIS, H. A. MCCAUGHEY, J. H. MUNGER, J. W. OECHEL, W. SCHAEFFER, K. Use of change-point detection for friction–velocity threshold evaluation in eddy-covariance studies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 171–172, n. 4, p. 31–45, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.023>.

BEER, C. CIAIS, P. REICHSTEIN, M. BALDOCCHI, D. LAW, B. E. PAPELE, D. SOUSSANA, J. F. AMMANN, C. BUCHMANN, N. FRANK, D. GIANELLE, D. JANSSENS, I. A. KNOHL, A. KÖSTNER, B. MOORS, E. ROUPSARD, O. VERBEECK, H. VESALA, T. WILLIAMS, C. A. WOHLFAHR, G. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. **Global**

Biogeochemical Cycles, Washington, v. 23, n. 2, 2009.

<http://dx.doi.org/10.1029/2008GB003233>.

BRÜMMER, C. BLACK, T. A. JASSAL, R. S. GRANT, N. J. SPITTLEHOUSE, D. L. CHEN, B. NESIC, Z. AMIRO, B. D. ARAIN, M. A. BARR, A. G. BOURQUE, C. P. A. COURSOLE, C. DUNN, A. L. FLANAGAN, L. B. HUMPHREYS, E. R. LAFLEUR, P. M. MARGOLIS, H. A. MCCAUGHEY, J. H. WOFSY, S. C. How climate and vegetation type influence evapotranspiration and water use efficiency in Canadian forest, peatland and grassland ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 153, n. 2, p. 14–30, 2012.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.04.008>.

BRUNSELL, N. A. NIPPERT, J. B. BUCK, T. L. Impacts of seasonality and surface heterogeneity on water-use efficiency in mesic grasslands. **Ecohydrology**, v.7, n. 4, p. 1223–1233, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/eco.1455>.

BURBA, G., ANDERSON, D. **A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements**: Principles and workflow examples for scientific and industrial applications. Lincoln: LI-COR Biosciences, 2010. 212p.

BURKETT, V. R. WILCOX, D. A. STOTTLEMYER, R. BARROW, W. FRAGRE, D. BARON, J. PRICE, J. NIELSEN, J. L. ALLEN, C. D. PETERSON, D. L. RUGGERONE, G. DOYLE, T. Nonlinear dynamics in ecosystem response to climatic change: case studies and policy implications. **Ecological Complexity**, v.2, n. 4, p. 357–394, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecocom.2005.04.010>.

CABRAL, O. M. R. ROCHA, H. R. GASH, J. H. LIGO, M. A.V. RAMOS, N. P. PACKER, A. P. BATISTA, E. R. Fluxes of CO₂ above a sugarcane plantation in Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 182 – 183, n. 12, p. 54 – 66, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.08.004>.

CABRAL, O. M. R., GASH, J. H. C., ROCHA, H. R., LIGO, M. A. V., FREITAS, H. C., TATSCH, J. D. Fluxes of CO₂ above a plantation of Eucalyptus in southeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 151, n. 1, p. 49–59, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.003>.

CHEN, B., ZHANG, X., TAO, J., WU, J., WANG, J., SHI, P., ZHANG, Y., YU, C., The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v.189, n. 6, p. 11–18, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.002>.

DESAI, A. R. RICHARDSON, A. D, MOFFAT, A. M. KATTGE, J. HOLLINGER, D. Y. BARR, A. FALGE, E. NOORMETS, A. PAPALE, D. REICHSTEIN, M. STAUCH, V, J, Cross-site evaluation of eddy covariance GPP and RE decomposition techniques. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 148, n. 6-7, p. 821–838, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.11.012>

GILMANOV, T.G., TIESZEN, L.L., WYLIE, B.K., FLANAGAN, L.B., FRANK, A.B., HAFERKAMP, M.R., MEYERS, T.P., MORGAN, J.A. Integration of CO₂ flux and remotely-sensed data for primary production and ecosystem respiration analyses in the Northern Great Plains: potential for quantitative spatial extrapolation. **Global**

Ecology and Biogeography, Oxford, v. 14, n. 3, p. 271–292, 2005. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1466-822X.2005.00151.x>.

GU, L. FALGE, E. M. BODEN, T. BALDOCCHI, D. D. BLACK, T. A. SALESKA, S. R. SUNI, T. VERMA, S. B. VESALA, T. WOFSY, S. C. XU, L. Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 128, n. 3-4, p.179–197, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.11.006>.

GUO, R. P., LIN, Z. H., MO, X. G., YANG, C. L. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v. 97, n. 8, p. 1185–1194, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.07.006>.

IPCC, 2007. *in*: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M., MILLER, H.L. (Eds.). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996p.

JIANG, Y. ZHANG, J. XU, X. DONG, Z. A GPP assimilation model for the southeastern Tibetan Plateau based on CO₂ eddy covariance flux tower and remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 23, n. 8, p. 213–225, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.08.015>.

KRISHNAN, P. MEYERS, T. D. SCOTT, R. L. KENNEDY, L. HEUER, M. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semi-arid grasslands in North America. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 153, n. 2, p. 31–44, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.017>.

KUZYAKOV, Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 38, n. 3, p.425–448, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.020>.

LAW, B.E., RYAN, M.G., ANTHONI, P.M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem. **Global Change Biology**, Oxford, v. 6, n. 2, p.169–182, 1999. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00214.x>.

LEUNING, R., VAN GORSEL, E., MASSMAN, W.J., ISSAC, P.R. Reflections on the surface energy imbalance problem. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 156, n. 4, p. 65–74, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.12.002>.

LLOYD J, TAYLOR J.A. On the temperature dependence of soil respiration. **Functional Ecology**, v.8, n. 3, p.315–323, 1994. <http://dx.doi.org/10.2307/2389824>.

LOEW, A. BODEGOM, M. V. WIDLowski, J. L. OTTO, J. QUAlIFE, T. PINTY, B. RADDATZ, T. Do we (need to) care about canopy radiation schemes in DGVMs? Caveats and potential impacts. **Biogeosciences**, Hoboken, v. 11, n.7, p. 1873–1897. 2014. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-11-1873-2014>.

LOPES, N.F. LIMA, M.G.S. **Fisiologia da Produção**. Viçosa: Editora UFV, 2015. 492p.

LUO, Y. ZHOU, X. **Soil Respiration and the Environment**. Elsevier, 2006. 328p.

LUYSSAERT, S., INGLIMA, I., JUNG, M., RICHARDSON, A.D., REICHSTEIN, M., PAPALE, D., PIAO, S.L., SCHULZE, E.D., WINGATE, L., MATTEUCCI, G., ARAGAO, L., AUBINET, M., BEER, C., BERNHOFER, C., BLACK, K.G., BONAL, D., BONNEFOND, J.M., CHAMBERS, J., CIAIS, P., COOK, B., DAVIS, K.J., DOLMAN, A.J., GIELEN, B., GOULDEN, M., GRACE, J., GRANIER, A., GRELE, A., GRIFFIS, T., GRÜNWARD, T., GUIDOLOTTI, G., HANSON, P.J., HARDING, R., HOLLINGER, D.Y., HUTYRA, L.R., KOLARI, P., KRUIJT, B., KUTSCH, W., LAGERGREN, F., LAURILA, T., LAW, B.E., LEMAIRE, G., LINDROTH, A., LOUSTAU, D., MALHI, Y., MATEUS, J., MIGLIAVACCA, M., MISSON, L., MONTAGNANI, L., MONCRIEFF, J., MOORS, E., MUNGER, J.W., NIKINMAA, E., OLLINGER, S.V., PITA, G., REBMANN, C., ROUPSARD, O., SAIGUSA, N., SANZ, M.J., SEUFERT, G., SIERRA, C., SMITH, M.L., TANG, J., VALENTINI, R., VESALA, T., JANSSENS, I.A. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. **Global Change Biology**, Oxford, v. 13, n.12, p. 2509–2537, 2007. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x>.

O'MARA, F. P. The role of grasslands in food security and climate change. **Annals of Botany**, Londres, v.110, n. 6, p.1263–1270, 2012. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcs209>.

OLIVEIRA, M. B. L. RANDOW, C. V. MANZI, A. O. ALVALÁ, R. C. S. SÁ, L. D. A. LEITÃO, M. M. V. B. R. SOUZA, A. Fluxos turbulentos de energia sobre o Pantanal Sul Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.21, n.3b, 159-165, 2006.

PELTOLA, O. HENSEN, A. MARCHESINI, L. B. HELFTER, C. BOSVELD, F. C. VAN DEN BULK, W. C. M. HAAPANALA, S. VAN HUISSTEDEN, J. LAURILA, T. LINDROTH, A. NEMITZ, E. RÖCKMANN, T. VERMEULEN, A. T. MAMMARELLA, I. Studying the spatial variability of methane flux with five eddy covariance towers of varying height. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 214-215, n.12, p.456–472, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.007>.

REICHSTEIN, M. FALGE, E. BALDOCCHI, D. PAPALE, D. AUBINET, M. BERBIGIER, P. BERNHOFER, C. BUCHMANN, N. GILMANOV, T. GRANIER, A. GRÜNWARD, T. HAVRÁNKOVÁ, K. ILVESNIEMI, H. JANOUS, D. KNOHL, A. LAURILA, T. LOHILA, A. LOUSTAU, D. MATTEUCCI, G. MEYERS, T. MIGLIETTA, F. OURCIVAL, J. M. PUMPANEN, J. RAMBAL, S. ROTENBERG, E. SANZ, M. TENHUNEN, J. SEUFERT, G. VACCARI, F. VESALA, T. YAKIR, D. VALENTINI, R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, Oxford, v.11, n. 9, p.1424–1439, 2005. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>.

RILEY, W.J., STILL, C.J., HELLIKER, B.R., RIBAS-CARBO, M., BERRY, J.A. ¹⁸O composition of CO₂ and H₂O ecosystem pools and fluxes in a tallgrass prairie:

simulations and comparisons to measurements. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, n.11, p. 1567–1581, 2003. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00680.x>.

SANTOS, E. WAGNER-RIDDLE, C. LEE, X. WARLAND, J. BROWN, S. STAEBLER, R. BARTLETT, P. KIM, K. Temporal dynamics of oxygen isotope compositions of soil and canopy CO₂ fluxes in a temperate deciduous forest. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 119, n. 5, p. 996-1013, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/2013JG002525>.

SENAPATI, N. JANSSON, P. E. SMITH, P. CHABBI, A. Modelling heat, water and carbon fluxes in mown grassland under multi-objective and multi-criteria constraints. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 80, n. 6, p. 201-224, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.025>.

SMITH, P., MARTINO, D., CAI, Z., GWARY, D., JANZEN, H.H., KUMAR, P., MCCARL, B., OGLE, S., O'MARA, F., RICE, C., SCHOLES, R.J., SIROTENKO, O., HOWDEN, M., MCALLISTER, T., PAN, G., ROMANENKOV, V., SCHNEIDER, U., TOWPRAYOON, S., WATTENBACH, M., SMITH, J.U. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, Londres, v. 363, n. 2, p.789-813, 2008. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>.

STEDUTO, P. HSIAO, T. FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, Nova York, v. 25, n. 3, p. 189–207, 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>.

TANG, X. LIA, H. XU, X, LUO, J. LI, X. DING, Z. XIE, J. Potential of MODIS data to track the variability in ecosystem water-use efficiency of temperate deciduous forests. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 91, n. 6, p. 381–391, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.022>.

THOMAS, C. MARTIN, J. G. GOECKEDE, M. SIQUEIRA, M. B. FOKEN, T. LAW, B. E. LOESCHER, H. W. KATUL, G. Estimating daytime subcanopy respiration from conditional sampling methods applied to multi-scalar high frequency turbulence time series. **Agricultural and forest meteorology**, Amsterdã, v. 148, n. 8-9, p. 1210 – 1229, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.002>.

TONG, X. ZHANG, J. MENG, P. LI, J. ZHENG, N. Ecosystem water use efficiency in a warm-temperate mixed plantation in the North China. **Journal of Hydrology**, Amsterdã, v. 512, n. 5, p. 221–228, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.042>.

TURNER, D.P., RITTS, W.D., ZHAO, M., KURC, S.A., DUNN, A.L., WOFYSY, S.C., SMALL, E.E., RUNNING, S.W. Assessing interannual variation in MODIS-based estimates of gross primary production. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 44, n. 7, p.1899–1907, 2006. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2006.876027>.

VICKERS, D. THOMAS, C. K. MARTIN, J. G. LAW, B. Self-correlation between assimilation and respiration resulting from flux partitioning of eddy-covariance CO₂

fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 149, n. 9, p. 1552–1555, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.03.009>.

WEHR, R. SALESKA, S. R. An improved isotopic method for partitioning net ecosystem–atmosphere CO₂ exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 214-215, n. 12, p. 515–531, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.009>.

XIE, J. CHEN, J. SUN, G. ZHA, T. YANG, B. CHU, H. LIU, J. WAN, S. ZHOU, C. MA, H. BOURQUE, C. P. A. SHAO, C. JOHN, R. OUYANG, Z. Ten-year variability in ecosystem water use efficiency in an oak-dominated temperate forest under a warming climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 218–219, n. 3, p. 209–217, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.059>.

ZHANG, L., WYLIE, B., JI, L., GILMANOV, T.G., TIESZEN, L. Climate-driven interannual variability in net ecosystem exchange in the northern Great Plains grasslands. **Rangeland Ecology & Management**, Lawrence, v.63, n. 1, p. 40–50, 2010. <http://dx.doi.org/10.2111/08-232.1>.

ZHANG, T. PENG, J. LIANG, W. YANG, Y. LIU, Y. Spatial–temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000–2010. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 565, n. 9, p. 105–122, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.126>.

ZHU, X. YU, G. WANG, Q. HU, Z. HAN, S. YAN, J. WANG, Y. ZHAO, L. Seasonal dynamics of water use efficiency of typical forest and grassland ecosystems in China. **Journal of Forest Research**, v. 19, n. 1, p. 70–76. 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s10310-013-0390-5>.

CAPÍTULO 2

PARTIÇÃO DO FLUXO LÍQUIDO DE CO₂ EM FOTOSÍNTESE E RESPIRAÇÃO E EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA EM ECOSISTEMA DE PASTAGEM

1. INTRODUÇÃO

As pastagens naturais estão entre os maiores biomas existentes, ocupando cerca de 37% da superfície terrestre do planeta. Esse bioma contribui de forma significativa para a segurança alimentar, pois fornece forragem para ruminantes que servem como fontes de carne e leite para o consumo humano e contribui para a manutenção da biodiversidade (PEICHL et al., 2011; O'MARA, 2012). Além de desempenhar um papel fundamental nos ciclos do carbono e água (O'MARA, 2012).

A troca líquida do ecossistema (NEE) é uma variável de grande importância, definida como o balanço entre a fotossíntese (GPP) e a respiração do ecossistema (R_{eco}) (TONG et al., 2012; CHEN et al., 2015). Esta variável vem sendo amplamente medida em diferentes ecossistemas para entender a dinâmica temporal do ciclo do carbono. Porém, em pastagens naturais são poucos estudos realizados com a finalidade de verificar o comportamento dos componentes da NEE.

A dinâmica do fluxo de carbono em pastagens naturais apresenta maior sensibilidade a eventos climáticos extremos, como secas e ondas de calor, quando comparadas com florestas (POLLEY et al., 2010).

Uma vez que a fotossíntese e a respiração são processos distintos controlados por variáveis forçantes diferentes, torna-se essencial a separação desses processos no ecossistema para melhorar a compreensão do ciclo de carbono em ecossistemas. Além de serem fundamentais para validar e parametrizar modelos de ciclo de carbono que são acoplados com o clima e com modelos de

dinâmica de ecossistema. Assim, vários estudos utilizam modelos de partição dos fluxos líquidos de carbono (BALDOCCHI et al., 2015).

Segundo Grant et al. (2012) a dinâmica do carbono em pastagens varia com as estações do ano, nas quais esses ecossistemas comportam-se alternadamente como fonte e sumidouro de carbono. A técnica de correlação de vórtices turbulentos é ideal para o estudo do potencial de sequestro de carbono desses ecossistemas, pois permite medidas com alta resolução temporal (< 1 hora) por longos períodos de tempo.

A eficiência do uso de água (EUA) é um importante índice ecofisiológico que permite relacionar os ciclos da água do ecossistema e de carbono (YU et al., 2008). Na escala de ecossistema, eficiência do uso de água (EUA) é geralmente calculada pela relação entre a produção primária bruta e a evapotranspiração (HUANG et al., 2015).

O estudo da eficiência do uso de água em nível de ecossistema fornece informações valiosas à resposta global da distribuição de água às alterações climáticas, incluindo condições ambientais extremas, possibilitando conhecer melhor o funcionamento da dinâmica do ciclo da água e de carbono em diferentes ecossistemas (NIU et al., 2011).

O entendimento dessa variável se dá pelas respostas ao nível das folhas (regulação estomática), evaporação da água do solo, composição florística e capacidade fotossintética, além das variáveis meteorológicas do local. Assim, a determinação do uso eficiente de água proporciona melhor compreensão dos processos intrínsecos envolvidos nas respostas fisiológicas dessa vegetação ao longo do tempo e como isso afeta o ciclo do carbono.

Além disso, numa escala global, o estudo de fluxo de calor latente e eficiência do uso da água em diferentes ecossistemas terrestres são fundamentais para a compreensão do seu papel nos ciclos hídricos locais, regionais e globais, na troca de vapor de água entre a superfície da Terra a atmosfera e na demanda ao nível de folha de água em função extração da água do solo pela planta (BRÜMMER et al., 2012).

Dessa forma, experimentos que visam quantificar os processos biofísicos, especificamente fluxo de CO₂ e uso eficiente de água nas pastagens naturais são necessários para melhorar os modelos atuais de circulação global e o nosso entendimento das respostas de ecossistemas frente aos fatores ambientais.

O objetivo do trabalho foi separar o fluxo líquido de carbono em fotossíntese e respiração do ecossistema e quantificar a eficiência do uso de água em pastagem natural por meio de medidas obtidas através da técnica de covariância de vórtices turbulentos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Sítio experimental

O sítio experimental está localizado em uma área de pastagem natural com aproximadamente 3.487 hectares, na Universidade do Estado do Kansas (39°05' N, 96°35' W, altitude 378 m), em Manhattan, Kansas, Estados Unidos.

O clima da região é caracterizado por variabilidade sazonal e interanual significativa, com menor temperatura média do ar em janeiro (-2,7 °C) e com uma maior em julho (26,6 °C). A precipitação média anual total é de 835 mm e o solo do local é classificado como Neossolo, caracterizado por possuir pouca profundidade.

O local de estudo é dominado principalmente por gramíneas C₄ nativas, como *Andropogon gerardii*, *Panicum virgatum*, *Schizachyrium scoparium* e *Sorghastrum*

nutans (NIPPERT et al., 2011), cuja altura média é de 1,0 m (Figura 1). No local não ocorre pastejo, todavia neste sítio ocorrem queimadas bienais.



Figura 1: Pastagem natural da área experimental. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.

2.2 Medida dos fluxos

Medições dos fluxos de CO₂, calor latente e sensível foram realizadas com uso da covariância de vórtices turbulentos durante o período de maio a outubro de 2016.

O fluxo de CO₂ (F_c) foi obtido pelo cálculo de covariância em flutuações:

$$F_c = \rho \overline{w'c'} \quad (1)$$

em que: F_c , é expresso em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ρ é a densidade molar do ar seco (mol m^{-3}), w' é a flutuação da velocidade vertical do vento (m s^{-1}) e c' é a flutuação concentração do CO₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$). A barra superior ($\overline{\quad}$) representa a média do produto.

O fluxo de calor latente (LE) foi calculado da mesma forma:

$$LE = \rho \lambda \overline{w'q'} \quad (2)$$

em que: LE é expresso em $W\ m^{-2}$, λ é calor latente de vaporização da água ($J\ kg^{-1}\ H_2O$) e q' é a razão de mistura do vapor d'água ($kg\ H_2O\ mol^{-1}$). A barra superior (—) representa a média do produto.

As concentrações de CO_2 e de vapor d'água foram medidas por meio de um analisador de gás infravermelho (LI7500, Licor, Lincoln, Nebraska), com uma leve inclinação de 15° , conforme instrução do fabricante para minimizar o acúmulo de água em dias chuvosos. Para medição de velocidade do vento foi utilizado um anemômetro sônico (CSAT3, Campbell Scientific, Logan, UT). Ambos os instrumentos medidores de fluxo estavam localizados na torre micrometeorológica na altura de 2,5 m (Figura 3). Todas as variáveis micrometeorológicas foram medidas a uma frequência de 20 Hz utilizando-se um sistema de aquisição de dados (CR3000, Campbell Scientific).

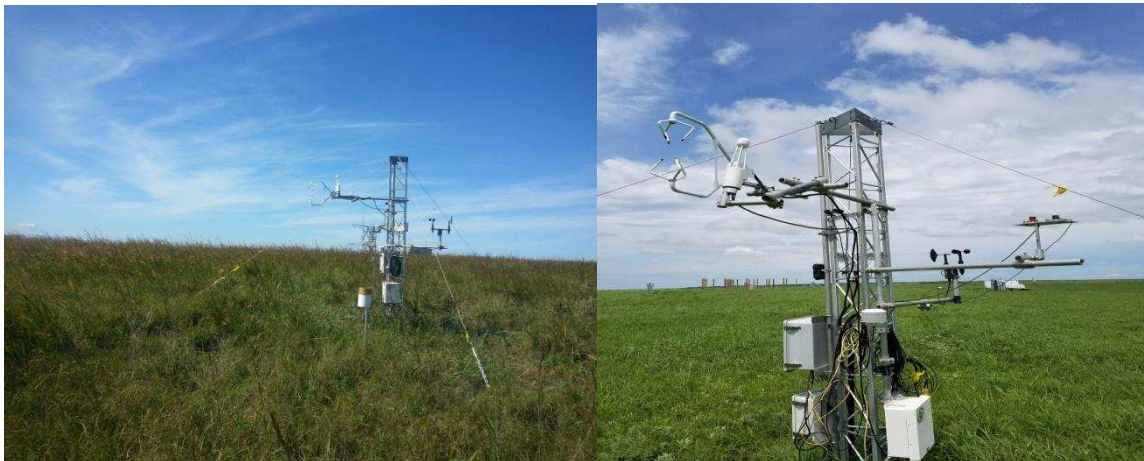


Figura 2: Torre micrometeorológica instalada na área de pastagem natural.

Os dados de fluxos obtidos foram processados no software EddyPro 6.0 (Licor, Lincoln, Nebraska, 2015), com base na metodologia de Aubinet (2012). A qualidade dos fluxos calculados foi verificada por meio de um sistema de controle de

qualidade baseado em um sistema de índices de qualidade variando de 0 a 2 (FOKEN, 2004).

A temperatura e umidade relativa do ar foram medidas por um termohigrômetro eletrônico (HMP60L, Campbell Scientific) e foram instalados em uma torre meteorológica a 1,5 m acima do solo, já o sensor de temperatura e umidade do solo (CWS655, Campbell Scientific) foi instalado a 10 cm de profundidade. A precipitação pluviométrica foi medida por um pluviômetro (TE525-L, Campbell Scientific, Logan, UT) na altura de 1,0 m.

2.3 Separação dos componentes do fluxo líquido de CO₂

A separação do NEE em fotossíntese (GPP) e respiração do ecossistema (Reco) foi feita de acordo com o proposto por Baldocchi (2015). As variáveis GPP e Reco foram obtidas pela seguinte equação.

$$GPP_{\text{diurno}} = NEE_{\text{diurno}} - Reco_{\text{diurna}} \quad (3)$$

em que a GPP é a fotossíntese ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); NEE é troca líquida do ecossistema ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e; Reco é a respiração do ecossistema ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

A respiração do ecossistema durante o período diurno foi estimada a partir de média dos valores de NEE noturno (respiração do ecossistema), a cada dois meses, dentro da estação de crescimento da pastagem natural (maio a outubro). Para a estimativa da Reco diurna, foram testados três modelos: 1) regressão não linear entre o NEE e temperatura do solo (Ts), 2) regressão linear entre NEE e umidade do solo (θ) e 3) combinado NEE com temperatura (Ts) e umidade do solo (θ), por meio do uso do software Statistica 8.0. Utilizando os seguintes modelos:

$$\text{Reco} = \beta_0 e^{\beta_1 T_s} \quad (4)$$

$$\text{Reco} = \beta_0 + \beta_1 \theta \quad (5)$$

$$\text{Reco} = \beta_0 e^{\beta_1 T_s} \theta^{\beta_2} \quad (6)$$

em que a Reco é Respiração do ecossistema ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); β_0 , β_1 e β_2 são parâmetros da regressão; T_s é a temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$) e θ é a umidade do solo ($\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O m}^{-3}$ solo).

Os procedimentos para a obtenção dos parâmetros das Equações 4, 5 e 6, seguiram a metodologia de Xu e Qui (2001). O coeficiente de temperatura (Q_{10}) foi obtido seguindo o procedimento descrito por Xu e Baldocchi (2004).

$$Q_{10} = e^{10 \beta_1} \quad (7)$$

Em que: Q_{10} é o coeficiente de temperatura e β_1 é o parâmetro da regressão.

2.4 Eficiência do uso de água

O cálculo da eficiência do uso de água (EUA) foi realizado de acordo com Brunsell et al. (2014) e Tong et al. (2014), por meio da Equação 8.

$$\text{EUA} = \text{GPP}/\text{LE} \quad (8)$$

em que a EUA é a eficiência do uso de água ($\text{g C kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$), GPP é a fotossíntese ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e LE é o calor latente (W m^{-2}). Em seguida foi feita a conversão da EUA para a unidade de $\text{gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estimativa da respiração do ecossistema diurna

Para a estimativa da respiração do ecossistema diurna foi adotado o modelo exponencial em função da temperatura do solo devido apresentar maiores R^2 e coeficientes significativos (Tabela 1).

Tabela 1: Modelos de estimativa da respiração média noturna do ecossistema de pastagem em função da temperatura e umidade do solo e coeficientes de temperatura. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.

Maio – Junho						
Modelo	Equação	β_0	β_1	β_2	R^2	Q_{10}
Reco x T_s	Reco= $1,1395 \cdot e^{(0,0757 \cdot T_s)}$	1,1395	0,0757	-	0,67	2,13
Reco x θ	Reco= $11,1737 - 16,4180 \cdot \theta$	11,1737	-16,4180	-	0,40	-
Reco x T_s x θ	Reco= $1,0785 \cdot e^{(0,0858 \cdot T_s)} \cdot \theta^{(0,1384)}$	1,0785	0,0858	0,1384 ^{ns}	0,68	-
Julho – Agosto						
Modelo	Equação	β_0	β_1	β_2	R^2	Q_{10}
Reco x T_s	Reco= $1,6691 \cdot e^{(0,0652 \cdot T_s)}$	1,6691	0,0652	-	0,29	1,92
Reco x θ	Reco= $12,4219 - 12,9911 \cdot \theta$	12,4219	-12,9911	-	0,12	-
Reco x T_s x θ	Reco= $1,4390 \cdot e^{(0,0842 \cdot T_s)} \cdot \theta^{(0,2709)}$	1,4390	0,0842	0,2709 ^{ns}	0,32	-
Setembro – outubro						
Modelo	Equação	β_0	β_1	β_2	R^2	Q_{10}
Reco x T_s	Reco= $0,5221 \cdot e^{(0,1197 \cdot T_s)}$	0,5221	0,1197	-	0,87	3,31
Reco x θ	Reco= $12,443 - 19,25 \cdot \theta$	12,4430	-19,2499	-	0,17	-
Reco x T_s x θ	Reco= $0,5419 \cdot e^{(0,1213 \cdot T_s)} \cdot \theta^{(0,0699)}$	0,5419	0,1213	0,0699 ^{ns}	0,87	-

ns: não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

A partir dos modelos obtidos foi estimado o coeficiente de temperatura (Q_{10}) a cada dois meses durante o período estudado, em que foram encontrados valores superiores a 2,0 nos períodos maio-junho e setembro-outubro, o que representa alta taxa respiratória do ecossistema, visto que o Q_{10} representa o aumento da respiração a cada 10 °C (Tabela 1). Porém nos meses de julho-agosto o Q_{10} foi menor (1,92), possivelmente pelo fato de somente a temperatura do solo utilizada na estimativa não representar todos os processos biofísicos envolvidos nessa época na taxa respiratória, como por exemplo, alta taxa respiratória do dossel (Tabela 1).

Outro aspecto que pode ter influenciado menor valor de Q_{10} nos meses de junho e julho foram elevadas temperaturas (37°C), situação próxima à temperatura

basal superior das plantas C₄. Na faixa de temperatura ótima, as atividades metabólicas das raízes e dos microrganismos do solo fazem com que aumente a liberação de CO₂ para a atmosfera, refletindo no desenvolvimento das plantas (LUO; ZHOU, 2006).

Foi encontrada baixa correlação entre a respiração do ecossistema e a umidade do solo para a estimativa da Reco nesse local, devido à alta variabilidade do conteúdo de água no solo ao longo do dia, influenciada pelas características físicas do solo do experimento. Além disso, a interação entre os componentes do solo e a água é complexa.

Xu e Baldocchi (2004) ao analisarem um sítio de pastagem natural nos Estados Unidos, encontraram Q₁₀ acima de 2,0 durante a estação de crescimento, o que caracterizou alta atividade respiratória da pastagem em estudo.

3.2 Caracterização meteorológica do experimento

Durante os meses analisados, foram encontrados valores de temperatura do ar que variaram de próximo a 5°C no final de abril e outubro, caracterizado por menores temperaturas, por causa do outono, até por volta de 37°C nos meses de junho e julho. Na maior parte do período a temperatura do ar ficou na faixa de 15 a 35°C (Figura 3).

Em relação à umidade relativa, foram obtidos valores mínimos por volta de 20% até a condição de saturação de 100% (Figura 3).

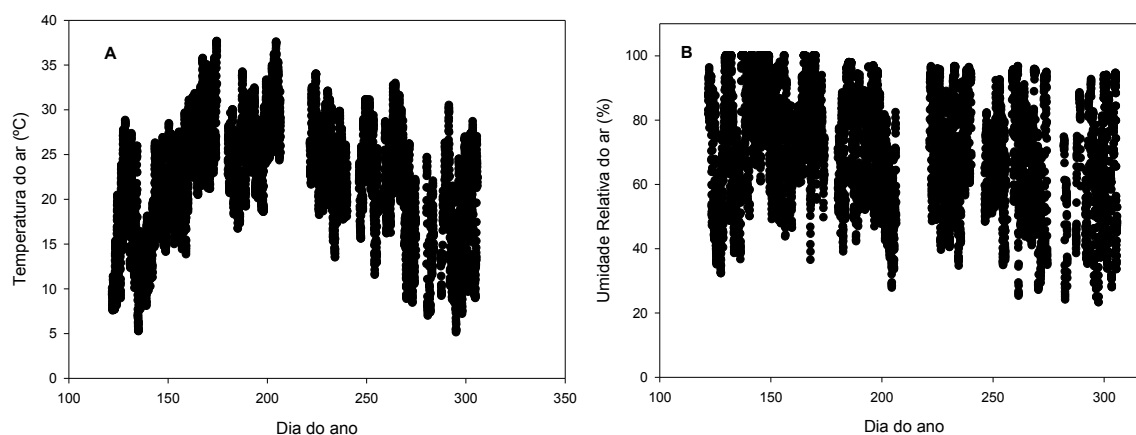


Figura 3: Temperatura (A) e umidade relativa do ar (B), medidas a cada 30 minutos, na pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.

Para a precipitação diária acumulada, ocorreu valor máximo de aproximadamente 28 mm, durante o mês de julho e se concentrou durante os meses de maio a agosto. O acumulado total durante o experimento de 264 mm (Figura 4). A maior frequência de chuva durante a estação de crescimento propiciou maior desenvolvimento das plantas.

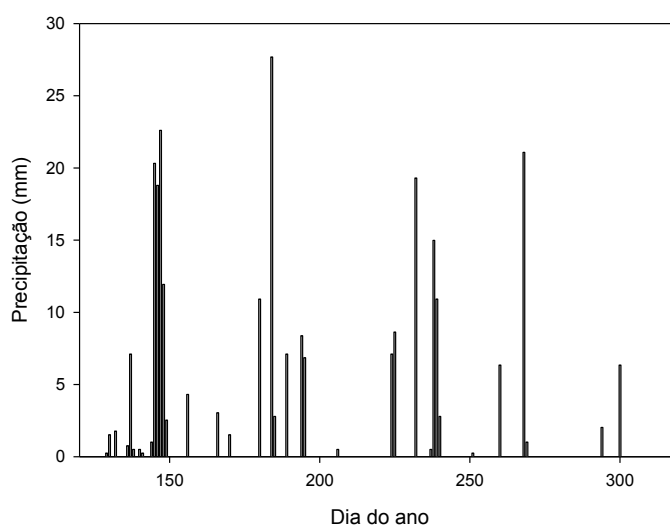


Figura 4: Precipitação diária acumulada na pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.

Na Figura 5 encontram-se os valores de temperatura e umidade do solo durante o ano de 2016, medidos a 10 cm de profundidade, em que para a temperatura do solo ocorreu variação de 10 a 37°C. Em relação à umidade do solo ocorreu maior valor durante o mês de maio, devido a maior frequência de precipitação pluviométrica nessa época, no experimento (Figura 5).

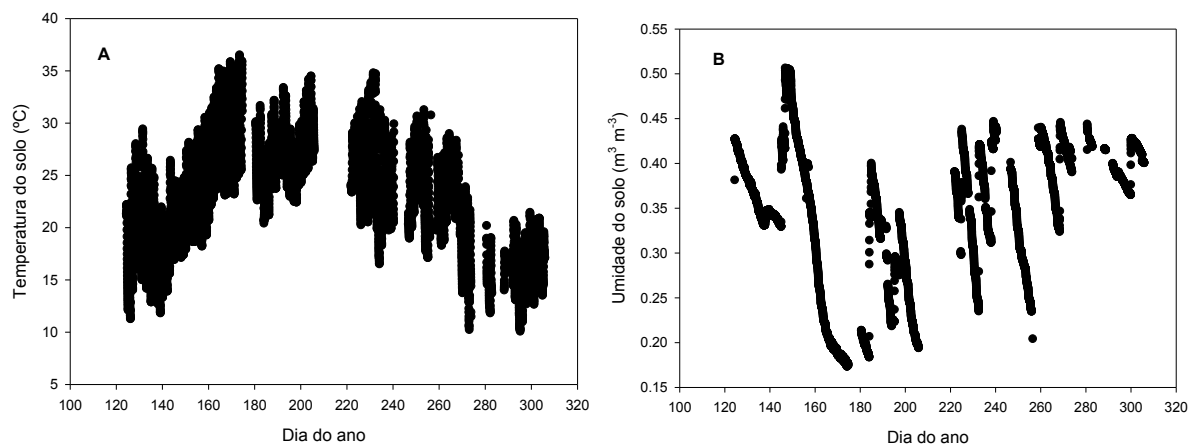


Figura 5: Temperatura (A) e umidade do solo (B) em pastagem natural medidas a uma profundidade de 10 cm a cada 30 minutos. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.

O fluxo calor sensível, responsável pela variação da temperatura do ar, ficou na faixa de 0 – 200 W m⁻², com valor máximo de 250 W m⁻² (Figura 6).

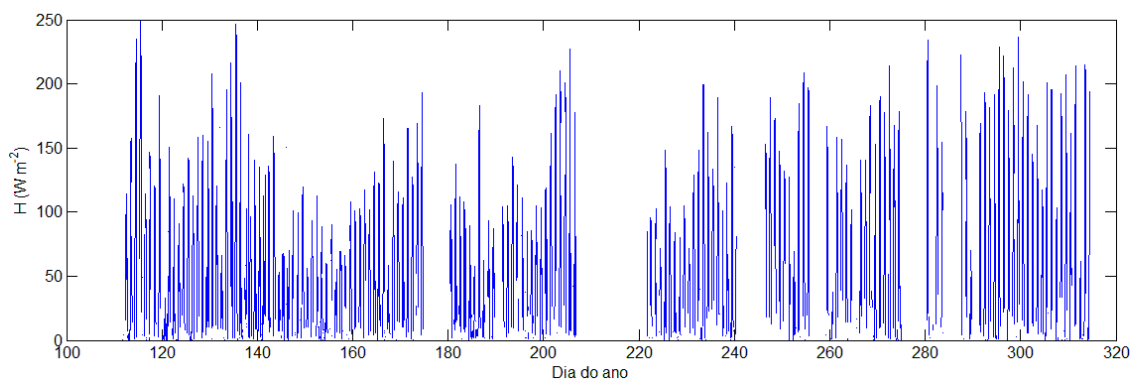


Figura 6: Calor sensível (H) em pastagem natural a cada 30 minutos. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.

Durante os meses de junho e julho (153-213 dias do ano) em que ocorreu maior desenvolvimento vegetativo, devido aos altos valores de temperatura do ar e presença frequente de chuvas, houve diminuição do fluxo de calor sensível, em virtude, do aumento da nebulosidade durante o período chuvoso que ocasiona a diminuição da incidência da radiação solar na superfície e da temperatura do ar. Além disso, devido ao aumento do índice de área foliar, ocorre maior cobertura do solo e uso predominante da energia disponível para a evapotranspiração (Figura 6).

3.3 Separação da troca líquida do ecossistema em fotossíntese e respiração do ecossistema

O comportamento da troca líquida do ecossistema (NEE) no ano de 2016 encontra-se na Figura 7. Em que durante a estação de crescimento (maio-outubro), observou-se valor máximo de NEE na faixa de $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e o valor mínimo de $-30 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 7).

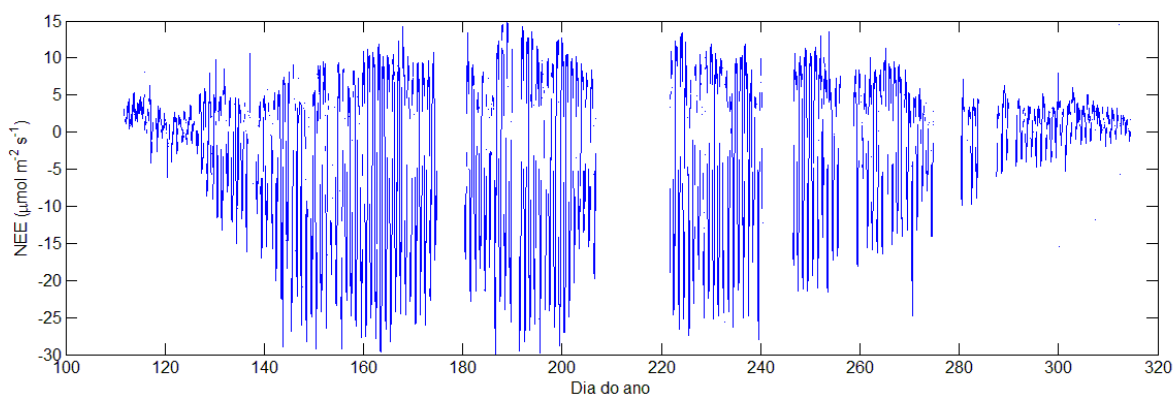


Figura 7: Troca líquida do ecossistema (NEE) a cada 30 minutos em pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.

Durante os meses de maio a outubro, observou-se que a pastagem atuou como sumidouro de carbono, contribuindo no sequestro de CO_2 atmosférico, resultado que mostra a grande importância desse ecossistema no balanço de carbono na Terra (SENAPATI et al., 2016). Além disso, essas respostas são

fundamentais em estudos para cenários futuros, para compreender a adaptação das pastagens frente as condições ambientais adversas.

São perceptíveis menores valores de NEE nos meses de maio e outubro, devido às características das estações mais frias, em que as atividades metabólicas das plantas são reduzidas em decorrência de menores temperaturas e precipitações. As plantas C₄ necessitam de temperaturas elevadas para a maximização da fotossíntese. Hu et al. (2008) encontraram comportamento semelhante em pastagens naturais na China, onde a fotossíntese foi minimizada no início e no fim da estação de crescimento.

Fischer et al. (2012) encontraram valores semelhantes aos encontrados neste trabalho, em sítio de pastagem natural nos Estados Unidos, em que a NEE variou de cerca de - 30 a 10 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ durante o ano de 2005 e 2006.

Ao realizar a partição do fluxo de CO₂ do ecossistema, a partir da relação exponencial com a temperatura do solo, verificou-se maior intervalo de incerteza nos meses de julho e agosto, em decorrência do baixo R² encontrado, porém foram obtidas maiores taxas de fotossíntese em relação à respiração do ecossistema em todos os meses analisados, o que promoveu maior acúmulo de biomassa nas plantas nos meses de junho (153-182 dias) e julho (183-213 dias) e menor nos meses de maio (122-152 dias) e outubro (275-305 dias) (Figura 8). A obtenção do erro da estimativa da fotossíntese foi realizada pelo uso do erro padrão superior e inferior dos coeficientes obtidos.

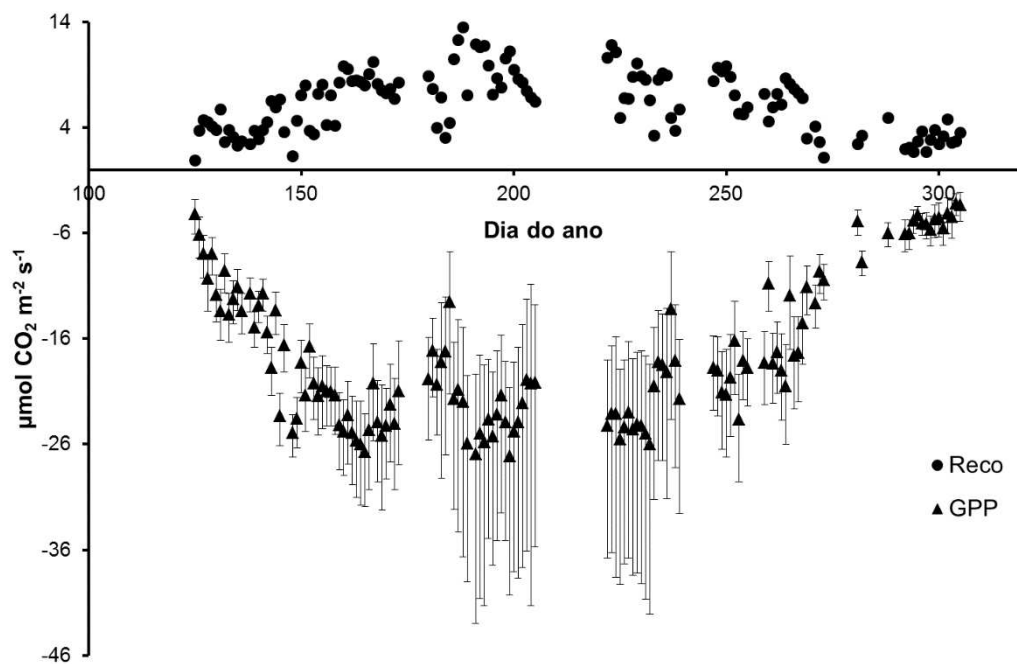


Figura 8: Partição do fluxo líquido CO_2 diário em fotossíntese (GPP) e respiração do ecossistema (Reco) em pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.

Outro aspecto importante é a relação diária entre respiração e fotossíntese, em que em dias que ocorrem maiores valores de fotossíntese, houve maiores taxas de respiração. Isso pode estar relacionado à maior produção de fotoassimilados, que são utilizados para a respiração de crescimento, sendo convertidos em parte aérea e desenvolvimento radicular.

O aumento da respiração durante a estação de crescimento, também está relacionada aos eventos de chuva, pois o aumento da umidade do solo possibilita maior atividade respiratória dos microrganismos do solo, aumentando o efluxo de CO_2 (CHOU et al., 2008).

A respiração do ecossistema é dependente da respiração autotrófica (plantas) e atividade heterotrófica (microbiota), e ambos são controlados por condições ambientais, principalmente temperatura e disponibilidade de água e fornecimento de

carboidratos e outros substratos (REICHSTEIN et al., 2002; FLANAGAN; JOHNSON, 2005).

Baldocchi et al. (2015) ao estudarem a correlação existente entre fotossíntese e respiração do ecossistema, encontraram forte correlação positiva, ou seja, quanto menor for a taxa de fotossíntese mais baixa será a atividade respiratória. Pois, a planta busca manter um balanço energético adequado para manter as suas atividades vitais.

3.4 Evapotranspiração e eficiência do uso de água

Em relação à evapotranspiração do ecossistema (ET), observam-se maiores valores durante os meses de junho (153-182 dias) e julho (183-213 dias) ($0,9 \text{ mm h}^{-1}$) e menores durante o mês de outubro, em que ocorre a senescência das folhas o que ocasiona a diminuição da área foliar da pastagem e redução da área transpiratória, além da menor disponibilidade de energia no sistema (Figura 9).

Hu et al. (2008) concluíram em estudo na China com pastagens naturais que o índice de área foliar é um fator crucial para o balanço de água entre a planta e a atmosfera, visto que a área foliar superou em 2-4 vezes a área evaporativa do solo, ocupada por uma planta.

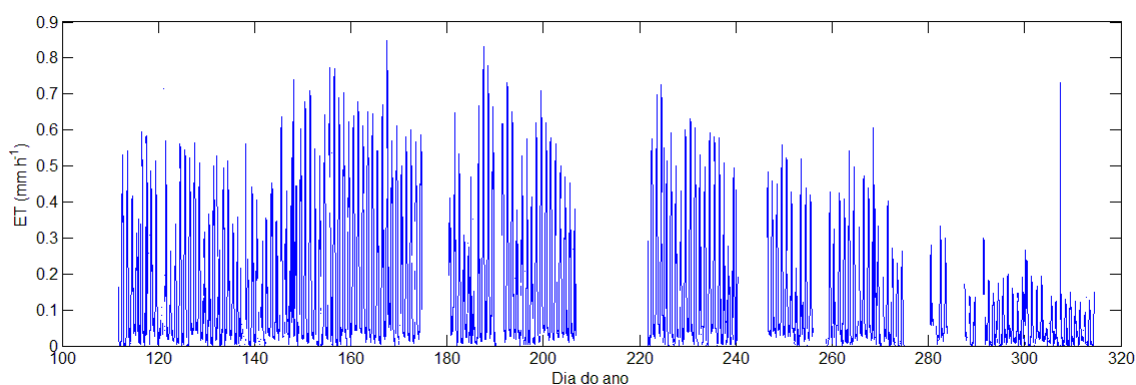


Figura 9: Evapotranspiração (ET) a cada 30 minutos em pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.

A ET aumenta em períodos chuvosos em que maior quantidade de água está armazenada no solo (FENG; LIU, 2016) o que contribui para a manutenção da abertura estomática para a realização de trocas gasosas, estimulada também pelas maiores temperaturas do ar (BRUNSELL et al., 2014).

O ajuste estomático permite que as plantas ocupem habitats com diferentes pressões ambientais, permitindo uma regulação dinâmica da difusão de CO_2 e H_2O no interior e fora das folhas. A abertura dos estômatos facilita a difusão de CO_2 da atmosfera para a cavidade subestomática. Simultaneamente, a água é perdida pela transpiração, que é movido pelo gradiente de concentração do vapor de água, de acordo com a concentração de vapor d'água na atmosfera (MANZONI et al., 2011).

Durante o período analisado (maio-outubro) foi encontrado para eficiência do uso de água valores que variaram de 0,6 a 7,2 $\text{gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, em que na maior parte das medições dentro da faixa de 2-4 $\text{gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$. O valor médio de EUA do ano de 2016 foi de 3,1 $\text{gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, o que evidencia a alta eficiência da utilização da água nesse ecossistema (Figura 10). A faixa de EUA em plantas C_4 é entre 2 a 5 $\text{gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$, superadas apenas pelas plantas CAM. Enquanto as plantas C_3 apresentam eficiência do uso de água entre 1-3 $\text{gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ (KERBAUY, 2008).

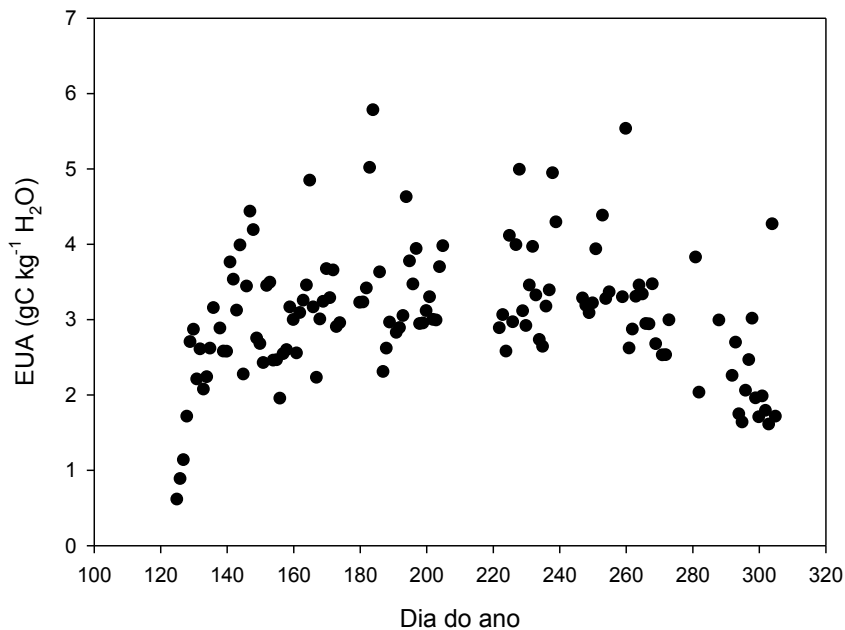


Figura 10: Eficiência do uso de água (EUA) diária em pastagem natural. Manhattan, Kansas, Estados Unidos, 2016.

Altas taxas de eficiência de uso de água refletem em maiores quantidades de carbono fixados pela planta para seu desenvolvimento, sendo uma estratégia adaptativa para locais em que a precipitação pluviométrica é baixa e as temperaturas são elevadas. Com isso, as pastagens apresentam certa tolerância à baixa umidade do solo, um dos motivos é o seu mecanismo concentrador de CO₂ atmosférico.

Beer et al. (2009) ao calcularem a EUA de pesquisas realizadas anteriormente em diferentes latitudes, observaram que essa variável variou de 2,1 a 4,35 gC kg⁻¹ H₂O em pastagens naturais, esses resultados estiveram relacionados com elevado índice de área foliar, pois o aumento da quantidade de folhas em uma área de solo, aumenta a EUA devido à diminuição da área evaporativa do solo.

Zhu et al. (2014) quantificaram a eficiência de uso de água em pastagens durante o período de 2003 a 2008 na China, obtiveram valor médio de 1,74 gC kg⁻¹ H₂O, com maiores valores nos meses de junho e julho. Os autores concluíram que a

dinâmica da EUA é influenciada diretamente pela variação da temperatura e evapotranspiração.

4 CONCLUSÕES

Durante o ano de 2016, a troca líquida do ecossistema (NEE) em pastagem natural variou de -30 a 15 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, influenciada diretamente pelo aumento da temperatura do ar, o que caracterizou esse ecossistema como sumidouro de carbono.

Para a estimativa da respiração diurna do ecossistema, o modelo exponencial foi que apresentou melhor relação com a temperatura do solo. Além disso, a umidade do solo apresentou baixa relação com a NEE durante o período analisado (maio-outubro).

Após a realização da partição da troca líquida do ecossistema, apresentou alta taxa fotossintética para as pastagens durante a estação de crescimento, o que refletiu em aumento da biomassa.

Foi encontrado altos valores para a eficiência do uso da água nesse período, em média de 3,1 $\text{gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, com menores perdas de água em função da quantidade de carbono assimilado.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUBINET, M., VESALA, T., PAPALE, D. **Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis**. Springer Press. 2012. 270p.

BALDOCCHI, D. STURTEVANT, C. CONTRIBUTORS, F. Does day and night sampling reduce spurious correlation between canopy photosynthesis and ecosystem respiration? **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 207, n. 7, p.117–126. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.010>.

BEER, C. CIAIS, P. REICHSTEIN, M. BALDOCCHI, D. LAW, B. E. PAPELE, D. SOUSSANA, J. F. AMMANN, C. BUCHMANN, N. FRANK, D. GIANELLE, D. JANSSENS, I. A. KNOHL, A. KÖSTNER, B. MOORS, E. ROUPSARD, O. VERBEECK, H. VESALA, T. WILLIAMS, C. A. WOHLFAHR, G. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 23, n. 2, 2009. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GB003233>.

BRÜMMER, C. BLACK, T. A. JASSAL, R. S. GRANT, N. J. SPITTLEHOUSE, D. L. CHEN, B. NESIC, Z. AMIRO, B. D. ARAIN, M. A. BARR, A. G. BOURQUE, C. P. A. COURSOLE, C. DUNN, A. L. FLANAGAN, L. B. HUMPHREYS, E. R. LAFLEUR, P. M. MARGOLIS, H. A. MCCAUGHEY, J. H. WOFYSY, S. C. How climate and vegetation type influence evapotranspiration and water use efficiency in Canadian forest, peatland and grassland ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 153, n. 2, p. 14–30, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.04.008>.

BRUNSELL, N. A. NIPPERT, J. B. BUCK, T. L. Impacts of seasonality and surface heterogeneity on water-use efficiency in mesic grasslands. **Ecohydrology**, Amsterdã, v.7, n. 4, p. 1223–1233, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/eco.1455>.

CHEN, Z. YU, G. ZHU, X. WANG, Q. NIU, S. HU, Z. Covariation between gross primary production and ecosystem respiration across space and the underlying mechanisms: A global synthesis. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 203, n.4, p. 180–190, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.01.012>.

CHOU, W. W. SILVER, W. L. JACKSON, R. D. THOMPSON, A. W. ALLEN-DIAZ, B. The sensitivity of annual grassland carbon cycling to the quantity and timing of rainfall. **Global Change Biology**, Oxford, v.14, n. 6, p.1382–1394, 2008. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01572.x>.

FENG, J. LIU, H. Response of evapotranspiration and CO₂ fluxes to discrete precipitation pulses over degraded grassland and cultivated corn surfaces in a semiarid area of Northeastern China. **Journal of Arid Environments**, Londres, v. 127, n. 4, p. 137-147, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.11.014>.

FISCHER, M. L. TORN, M. S. BILLESBACH, D. P. DOYLE, G. NORTHUP, B. BIRAUD, S. C. Carbon, water, and heat flux responses to experimental burning and drought in a tallgrass prairie. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 166 – 167, n. 12, p.169 – 174, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.07.011>.

FLANAGAN, L. B. JOHNSON, B. G. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v.130, p.237–253, 2005.

FOKEN, T., GOCKEDE, M. MAUDER, M. MAHRT, L. AMIRO, B. MUNGER, W. **Post-field quality control, in Handbook of micrometeorology: A guide for surface flux measurements**, Dordrecht: Kluwer Academic, p. 81-108. 2004.

GRANT, R. F. BALDOCCHI, D. D. MA, S. Ecological controls on net ecosystem productivity of a seasonally dry annual grassland under current and future climates: Modelling with ecosys. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 152, n. 1, p.189– 200, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.012>.

HU, Z. YU, G. FU, Y. SUN, X. LI, Y. SHI, P. WANG, Y. ZHENG, Z. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four grassland ecosystems in China. **Global Change Biology**, Oxford, v. 14, p.1609–1619, 2008. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01582.x>.

HUANG, M., PIAO, S., SUN, Y., CIAIS, P., CHENG, L., MAO, J., POULTER, B., SHI, X., ZENG, Z., WANG, Y., Change in terrestrial ecosystem water-use efficiency over the last three decades. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, n. 6, p. 2366–2378, 2015. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12873>.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2.ed. São Paulo: Guanabara Koogan, 2008. 452p.

LICOR. **EddyPro® 6.0 - Eddy Covariance Software**. Lincoln: Licor. 2015, 313p.

LUO, Y. ZHOU, X. **Soil Respiration and the Environment**. Elsevier, 2006. 328p.

MANZONI, S. VICO, G. KATUL, G. FAY, P. A. POLLEY, W. PALMROTH, S. PORPORATO, A. Optimizing stomatal conductance for maximum carbon gain under water stress: a meta-analysis across plant functional types and climates. **Functional Ecology**, Oxford, v. 25, n. 3, p.1-12, 2011. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01822.x>.

MASELLI, F., ARGENTI, G., CHIESI, M., ANGELI, L., PAPAIE, D. Simulation of grassland productivity by the combination of ground and satellite data. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 165, n. 1, p. 163–172, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.11.006>.

NIPPERT, J. B. OCHELTRIE, T. W. SKIBBE, A. M. KANGAS, L. C. HAM, J. M, ARNOLD. K. B. S. BRUNSELL, N. A. Linking plant growth responses across topographic gradients in tallgrass prairie. **Oecologia**, Berlim, v. 166, n. 4, p. 1131–1142, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-011-1948-6>.

NIU, S. ZHANG, Z. XIA, J. ZHOU, X. SONG, B. LI, L. WAN, S. Water use efficiency in response to climate change from leaf to ecosystem in a temperate steppe. **Global**

Change Biology, Oxford, v. 17, n. 2, p. 1073–1082, 2011.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02280.x>.

O'MARA, F. P. The role of grasslands in food security and climate change. **Annals of Botany**, Londres, v. 110, n. 6, p.1263–1270, 2012.
<http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcs209>.

PEICHL, M., LEAHY, P., KIELY, G. Six-year stable annual uptake of carbon dioxide in intensively managed humid temperate grassland. **Ecosystems**, Nova York, v. 14, n. 1, p. 112–126, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-010-9398-2>.

POLLEY, H. W. EMMERICH, W. BRADFORD, J. A. SIMS, P. L. JOHNSON, D. A. SALIENDRA, N. Z. SVEJCAR, T. ANGELL, R. FRANK, A. B. PHILLIPS, R. L. SNYDER, K. MORGAN, J. Physiological and environmental regulation of interannual variability in CO₂ exchange on rangelands in the western United States. **Global Change Biology**, Oxford, v. 16, n. 3, p. 990–1002, 2010.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01966.x>.

REICHSTEIN, M., TENHUNEN, J.D., ROUPSARD, O., OURCIVAL, J.-M., RAMBAL, S., MIGLIETTA, F., PERESSOTTI, A., PECCHIARI, M., TIRONE, G., VALENTINI, R. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses. **Global Change Biology**, Oxford, v. 8, n. 10, p.999–1017, 2002. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00530.x>.

SENAPATI, N. JANSSON, P. E. SMITH, P. CHABBI, A. Modelling heat, water and carbon fluxes in mown grassland under multi-objective and multi-criteria constraints. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 80, n. 6, p. 201-224, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.025>.

TONG, X. MENG, P. ZHANG, J. LI, J. ZHENG, N. HUANG, H. Ecosystem carbon exchange over a warm-temperate mixed plantation in the lithoid hilly area of the North China. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 49, n. 3, p. 257-267, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.049>.

TONG, X. ZHANG, J. MENG, P. LI, J. ZHENG, N. Ecosystem water use efficiency in a warm-temperate mixed plantation in the North China. **Journal of Hydrology**, Amsterdã, v. 512, n. 5, p. 221-228, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.042>.

XU, L. BALDOCCHI, D. D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 1232, n.1-2, p.79-96, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.10.004>.

XU, M., QI, Y. Soil surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young Ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, n. 6, p. 667-677, 2001. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1354-1013.2001.00435.x>

YU, D.Y., ZHU, W.Q., PAN, Y.H. The role of atmospheric circulation system playing in coupling relationship between spring NPP and precipitation in East Asia area. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 145, n. 1, p. 135–143, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-007-0023-6>.

ZHU, X. YU, G. WANG, Q. HU, Z. HAN, S. YAN, J. WANG, Y. ZHAO, L. Seasonal dynamics of water use efficiency of typical forest and grassland ecosystems in China. **Journal of Forest Research**, v. 19, n. 1, p. 70–76. 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s10310-013-0390-5>.