

Artigo

Sazonalidade do Balanço de Energia e Evapotranspiração em Área Arbustiva Alagável no Pantanal Mato-Grossense

Nadja Gomes Machado^{1,2}, Marcelo Sacardi Biudes², Lucas Peres Angelini², Dalila Morgana de Souza Mützenber², Danielle Christine Stenner Nassarden², Reinaldo de Souza Bilio¹, Tonny José Araújo da Silva³, Geraldo Aparecido Rodrigues Neves², Paulo Henrique Zanella de Arruda², José de Souza Nogueira²

¹Laboratório de Biologia da Conservação, Instituto Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

²Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

³Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil.

Recebido: 8/12/2014 – Aceito: 11/6/2015

Resumo

O Pantanal apresenta períodos de inundação que modelam a paisagem e atuam como filtro ao estabelecimento e desenvolvimento de plantas. Perturbações antrópicas ou naturais podem alterar a distribuição da energia disponível no ecossistema. Diante da necessidade de compreensão da variabilidade temporal do balanço de energia em paisagens naturais inundáveis, o objetivo deste estudo foi analisar a sazonalidade do balanço de energia em área arbustiva alagável composta por *Combretum lanceolatum* Pohl no Pantanal Mato-grossense. As estimativas do fluxo de calor latente (LE) e sensível (H), e da evapotranspiração (ET) foram obtidas pelo método da razão de Bowen entre maio de 2012 e abril de 2013. A energia disponível foi destinada prioritariamente ao LE (64,1%), seguido ao H (35,8%) e quase zero ao fluxo de calor no solo (0,1%). Os componentes do balanço de energia apresentaram forte sazonalidade, com maior LE durante a estação chuvosa e maior H durante a estação seca. A evapotranspiração foi menor durante a estação seca devido ao baixo conteúdo de água no solo e transpiração da vegetação dominante na área de estudo. Os resultados obtidos nesse trabalho sugerem que o ambiente estudado é limitado pela disponibilidade de energia e água.

Palavras chave: distribuição de energia, microclima, *Combretum lanceolatum*, áreas úmidas.

Seasonality of Energy Balance and Evapotranspiration in a Flooded Scrubland in the Pantanal of Mato Grosso

Abstract

The Pantanal has flood periods that model the landscape and act as a filter to the establishment and development of plants. Anthropogenic or natural disturbances can alter the available energy distribution in the ecosystem. Due to the need of understanding the temporal variability of the energy balance in flood natural landscapes, the objective of this study was to analyze the seasonality of the energy balance in flooded shrub area consisting of *Combretum lanceolatum* Pohl in Mato Grosso Pantanal. The estimates of latent (LE) and sensible (H) heat flux, and evapotranspiration (ET) were obtained by the method of Bowen ratio between May 2012 and April 2013. The available energy was intended primarily to LE (64.1%), followed by H (35.8%) and almost zero to heat flow in soil (0.1%). The components of the energy balance showed strong seasonality, with highest LE in the wet season and highest H in the dry season. The evapotranspiration was lower during the dry season due to the lower soil water content and transpiration of dominant vegetation in the study area. Results suggest that the study area was limited by the availability of energy and water.

Keywords: energy partitioning, evapotranspiration, *Combretum lanceolatum*, wetlands.

1. Introdução

As planícies de inundação tornaram-se prioritárias pela capacidade de manutenção da biodiversidade (Junk *et al.*, 2006), e contribuem para o balanço global de água, carbono, metano e enxofre na atmosfera (Kirk, 2004). O Pantanal, maior planície inundável do mundo, localizada no centro da América do Sul, cuja vegetação é composta por Amazônia, Cerrado e Chacos Boliviano e Paraguaio (Junk e Nunes da Cunha, 2005), apresenta variação sazonal do nível de água na superfície do solo (Junk *et al.*, 1989).

As frequentes flutuações nos níveis de inundação no Pantanal, provocadas pela baixa drenagem devido à topografia e solo argiloso, modelam a paisagem e atuam como um filtro ao estabelecimento e desenvolvimento da vegetação (Penha *et al.*, 1999; Arieira e Nunes da Cunha, 2006). Alterações na superfície do solo provocadas por perturbações antrópicas ou naturais podem alterar a energia disponível no ecossistema (Biudes *et al.*, 2015).

As variações sazonais das componentes do balanço de energia entre fluxo de calor latente (LE) e sensível (H) nos trópicos ainda não são totalmente compreendidas (Hasler e Avissar, 2007). Além disso, a área coberta por ecossistemas naturais no Brasil está encolhendo devido ao desmatamento, e dando origem a ecossistemas manejados, como culturas agrônomicas e pastagens (Fearnside, 2005), alterando os padrões temporais e espaciais do particionamento entre LE e H (Biudes *et al.*, 2009; Biudes *et al.*, 2012). No estado de Mato Grosso, a maior parte do desmatamento tem ocorrido em áreas de transição de floresta Amazônica-Cerrado, no Cerrado, e em áreas não-inundáveis do Pantanal (Fearnside, 2003; Azevedo e Saito, 2013).

Diante da necessidade de compreensão da variabilidade temporal do balanço de energia em paisagens naturais que sofrem perturbações naturais como a inundação, o objetivo deste estudo foi analisar a sazonalidade do balanço de energia em área arbustiva alagável composta por *Combretum lanceolatum* Pohl no Pantanal Mato-grossense.

2. Material e Métodos

2.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi conduzido no Pantanal Norte (16°29' S e 56°25' O), aproximadamente 160 km de Cuiabá, MT, Brasil (Figura 1), no Centro Avançado de Pesquisas da Universidade Federal de Mato Grosso, localizado no Parque Baía das Pedras da Estância Ecológica SESC-Pantanal, Poconé, MT. A vegetação predominante na área de estudo é composta por estande monodominante de *Combretum lanceolatum* Pohl, popularmente conhecido como pombeiral. Os solos da região são de origem sedimentar e ocorrem com dominância de solos hidromórficos (Coringa *et al.*, 2012), mas com predominância de argila na área de estudo (Machado *et al.*, 2015b). A topografia da região é praticamente plana, com ocorrência de inundações durante a estação chuvosa (Fantin-Cruz *et al.*, 2010).

2.2 Descrição da climatologia regional

O clima da região é classificado como Aw segundo Köppen, sendo quente e úmido com estação chuvosa no verão, e estação seca no inverno. A precipitação média anual é 1400 mm com estação seca de maio a setembro (Nunes da Cunha e Junk, 2001). A temperatura média anual

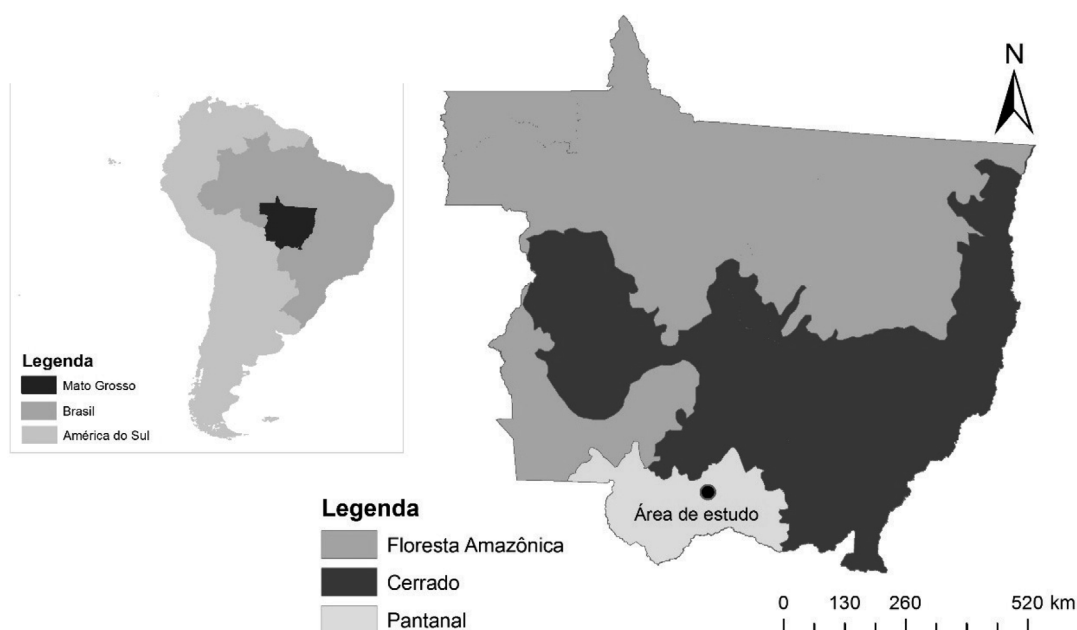


Figura 1 - Localização da área arbustiva alagável no Pantanal Mato-grossense, Brasil.

do ar varia entre 29 e 32 °C (máxima) e entre 17 e 20 °C (mínima) (Biudes *et al.*, 2014).

O padrão sazonal da precipitação, temperatura e umidade relativa do ar da região Centro-Oeste do Brasil onde se localiza a área de estudo é controlado principalmente por sistemas de grande porte e de mesoescala. O Centro-Oeste está sob influência climática de sistemas atmosféricos tropical e subtropical (Alves, 2009). Durante a estação chuvosa, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) está associada a uma saída convergente de umidade da Amazônia que passa pelo Centro-Oeste em direção ao Sudeste do Brasil, que é responsável por eventos extremos de chuva. Por outro lado, a ausência da ZCAS pode causar supressão da chuva e longos períodos de seca (Carvalho e Jones, 2009). Durante a estação seca, a convecção e precipitação são suprimidas devido à saída anticiclônica a partir de um sistema de alta pressão de nível superior denominado de “Alta da Bolívia” (Hardy *et al.*, 1998).

A “Alta da Bolívia” é gerada a partir de um forte aquecimento convectivo (liberação de calor latente) da atmosfera durante os meses de verão na Amazônia (Alves, 2009). Como consequência dessa circulação anticiclone, uma região de baixa pressão é formada nos baixos níveis da atmosfera, e a convergência de ar ocorre (Virji, 1981), causando o período de seca no Centro-Oeste (Kousky e Kayano, 1994). Além disso, há ondas de frio provocadas por surtos de ar polar durante o inverno (maio-agosto) com baixas temperaturas em latitudes médias, que afetam o sul do Brasil, com o arrefecimento considerável no centro e no norte da Amazônia (Parmenter, 1976; Marengo *et al.*, 1997).

2.3 Medidas micrometeorológicas

As medições contínuas das variáveis micrometeorológicas foram realizadas entre maio de 2012 a abril de 2013 por sensores instalados em uma torre de 28 m de altura de (Tabela 1). Os dados coletados pelos sensores micrometeorológicos foram lidos a cada 10 segundos e armazenados a cada 10 minutos em um datalogger (CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA). Todo o sistema foi alimentado por um conjunto de baterias mantidas carregadas por meio de painéis solares com reguladores de tensão (SP 65 Campbell Scientific Inc. Logan UT USA). Os dados de precipitação foram obtidos do produto 3B43 V6 do satélite

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), fornecidos pelo Distributed Active Archive System (DAAC), disponível em [http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM] (Danelichen *et al.*, 2013).

O Déficit de Pressão de Vapor (*DPV*) em kPa foi calculado como:

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

em que e_s é pressão de vapor saturada (kPa), e e_a é a pressão real de vapor (kPa), os quais foram calculados pelas seguintes equações:

$$e_s = 0,611 \times 10^{\left[\frac{7,5T_{ar}}{237,3 + T_{ar}} \right]} \quad (2)$$

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

em que T_{ar} é a temperatura do ar (°C) e UR é a umidade relativa do ar (%).

2.4. Estimativa do balanço de energia e evapotranspiração pelo Método da Razão de Bowen

Os fluxos de calor latente (*LE*) e sensível (*H*), e a evapotranspiração (*ET*) foram estimados pelo método da razão de Bowen (MRB). O MRB tem sido amplamente utilizado desde sua proposição em 1926, porque tem as vantagens de um conceito físico, alguns requisitos de parâmetros, e um método de cálculo simples (Hu *et al.*, 2013). A comparação de *LE* e *H* obtidos pelo MRB e método de covariância turbulenta mostram que, o MRB fornece valores exatos e confiáveis, e que o desvio de leitura dos instrumentos é mínimo em um período inferior a um ano (Drexler *et al.*, 2004; Billesbach e Arkebauer, 2012; Dicken *et al.*, 2013). O cálculo de MRB seguiu as orientações descritas por Perez *et al.* (1999). Os fluxos médios de *LE* e *H* ($W m^{-2}$) foram calculados, em intervalos de 30 minutos, pelas seguintes equações:

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (4)$$

$$H = \frac{Rn - G}{1 + \beta^{-1}} \quad (5)$$

Tabela 1 - Equipamentos utilizados para medição da radiação solar incidente (*Rg*), saldo de radiação (*Rn*), temperatura e umidade relativa do ar (Ta/UR), fluxo de calor no solo (*G*) e conteúdo de água no solo (*CAS*) e suas respectivas alturas de instalação na área de estudo.

Variável	Equipamento	Altura de instalação (m)
<i>Rg</i>	LI200X, LI-COR, Lincoln, NE, USA	20
<i>Rn</i>	NRLITE, Kipp & Zonen, Delft, Netherlands	20
Ta/UR	HMP-45AC, Vaisala Inc., Woburn, MA, USA	22/31
<i>G</i>	HFP01, Hukseflux Thermal Sensors BV, Delft, Netherlands	-0, 01
<i>CAS</i>	CS-615, Campbell Sci., Logan, UT, USA	-0, 10/-0, 20

em que, Rn é o saldo de radiação ($W m^{-2}$), G é o fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$) e β é a razão de Bowen definida como:

$$\beta = \left(\frac{C_p}{\lambda} \cdot 0.622 \right) \left(\frac{\Delta T}{\Delta e} \right) \quad (6)$$

em que C_p é o calor específico em pressão constante ($1.00467 J g^{-1} K^{-1}$), λ é o calor latente de vaporização ($J g^{-1}$) definido pela Eq. (7), 0.622 é a razão do peso molecular da água e do ar, e ΔT e Δe são as diferenças de temperatura ($^{\circ}C$) e pressão de vapor de água (kPa), respectivamente, entre as duas diferentes alturas de medidas (Tabela 1). O calor latente de vaporização foi estimado pela seguinte equação:

$$\lambda = 1,919 \times 10^6 \left(\frac{T + 273,16}{(T + 273,16) - 33,91} \right) \quad (7)$$

A evapotranspiração média ($mm\ 30\text{-min}^{-1}$) foi calculada como:

$$ET = \frac{LE}{\lambda} \quad (8)$$

A evapotranspiração diária foi obtida como a soma de 48 valores de evapotranspiração em intervalos médios de 30 min.

O critério para aceitar e/ou rejeitar os dados obtidos pelo MRB foram baseados naqueles descritos por Perez *et al.* (1999). Assumiu-se que os gradientes de temperatura e pressão entre os termohigrômetros foram suficientemente distantes, e que a distância da torre até a borda foi suficientemente grande para não ter efeito da advecção. O MRB falha quando (1) a resolução do sensor é inadequada para resolver os gradientes em ΔT e Δe (Unland *et al.*, 1996), (2) condições atmosféricas estáveis causam $\beta \approx -1$, como durante ao amanhecer e ao anoitecer (Ortega-Farias *et al.*, 1996), e (3) as condições mudam abruptamente levando à erros de medição (Perez *et al.*, 1999). Usando este método de filtragem, valores fisicamente realistas de β podem ser obtidos de forma objetiva e quantitativa que limita o potencial de viés e erro na estimativa termos do balanço de energia (Perez *et al.*, 1999).

2.5 Análises estatísticas

As lacunas nas estimativas de H e LE foram preenchidas usando relações lineares entre os valores acumulados de H e/ou LE e os valores medidos de $Rn - G$ (Grace *et al.*, 1996; Biudes *et al.*, 2015). O teste Mann-Whitney (Wilks, 2011) foi utilizado para verificar se houve sazonalidade nas variáveis micrometeorológicas, e nas estimativas do balanço de energia e da evapotranspiração. A distribuição da energia disponível (Rn) em LE e H com intervalo de confiança de $\pm 95\%$ foi determinada por meio de regressão linear, forçando a passagem na origem, onde a média diária (24 h) de LE ou H (variáveis dependentes) foram relacio-

nados com Rn em intervalos mensais. A inclinação destas regressões indicou a distribuição de Rn em LE ou H . As médias mensais e anuais com intervalo de confiança de $\pm 95\%$ das medidas das variáveis micrometeorológicas e das estimativas do balanço de energia e da evapotranspiração foram calculadas por bootstrapping de 1000 iterações das reamostragens aleatórias com substituição (Efron e Tibshirani, 1993).

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise das variáveis micrometeorológicas

A precipitação anual (PPT) na área de estudo foi 1432,2 mm. A PPT foi significativamente maior durante a estação chuvosa, representando 72,2% de toda água precipitada na área de estudo durante o ano analisado (Tabela 2). A estação seca teve índices pluviométricos baixos, sem precipitação em julho e agosto (Figura 2a), o que é consistente com a duração de 4-5 meses da estação seca na região (Biudes *et al.*, 2009, 2012; Danelichen *et al.*, 2013; Biudes *et al.*, 2014).

O conteúdo de água no solo nas duas profundidades permaneceu mais elevado de dezembro de 2012 a abril de 2013 (Figura 2a), que coincide com o período de inundação na área de estudo (Machado *et al.*, 2015a). A inundação na área de estudo pode ser explicada pela associação entre topografia plana, solo com predominância de argila (Machado *et al.*, 2015b), e intensidade da chuva com duração de 2-8 meses (Biudes *et al.*, 2009; Arieira *et al.*, 2011; Biudes *et al.*, 2014). Em geral, a inundação no Pantanal apresenta um padrão monomodal com pequena amplitude (Hamilton *et al.*, 1996).

O conteúdo de água no solo foi significativamente maior durante a estação chuvosa (10% maior que na estação seca) na área de estudo (Figura 2a; Tabela 2). Embora, o conteúdo de água no solo a 10 e 20 cm de profundidade tenham sido positivamente correlacionadas entre si (Tabela 3), o conteúdo de água no solo a 20 cm foi maior que a 10 cm durante a estação seca (Figura 2a; Tabela 2), indicando que a recarga de água subterrânea rasa durante esse período pode ter sido maior que próximo à superfície, em consequência da menor taxa de evapotranspiração (Figura 3C; Tabela 2) (Calder, 1998; Yang *et al.*, 2000). Finger (2012) apontou que a espécie predominante na vegetação da área de estudo (*Combretum lanceolatum*) apresentou redução de 56,6% na taxa fotossintética líquida e de 58,6% na condutância estomática durante a estação seca em relação à inundada, indicando redução em sua transpiração.

Houve diferença da temperatura do ar entre as estações seca e chuvosa, sendo 4% maior durante a estação chuvosa (Tabela 2). A temperatura média anual do ar foi 26 $^{\circ}C$, com mínima em Julho (22,8 $^{\circ}C$) e máxima em setembro (28,3 $^{\circ}C$) (Figura 2b). Também houveram diferenças significativas na umidade relativa do ar (Figura 2b) e

Tabela 2 - Médias anual e sazonais, amplitude anual relativa e valores de U e p-valor do teste de Man-Whitney sobre efeito das estações seca e chuvosa na precipitação (PPT; mm), temperatura do ar (T ; °C), umidade relativa do ar (UR; %), déficit de pressão de vapor (DPV ; kPa), conteúdo de água no solo a 10 cm e 20 cm de profundidade (CAS10 e CAS20; $m^3 m^{-3}$), radiação solar incidente (R_g ; $W m^{-2}$), saldo de radiação (R_n ; $W m^{-2}$), fluxo de calor latente (LE ; $W m^{-2}$), fluxo de calor sensível (H ; $W m^{-2}$), fluxo de calor no solo (G ; $W m^{-2}$) e evapotranspiração (ET ; $W m^{-2}$) na área arbustiva inundável no Pantanal Mato-grossense.

Variável	Média anual	Média da estação seca	Média da estação chuvosa	Amplitude Anual Relativa	U	P-valor
PPT	1432,2	66,25	172,45	1,79	120	0,005
T	26,0	25,06	26,95	0,21	144	< 0,001
UR	70,7	65,09	76,32	0,47	144	< 0,001
DPV	1,0	1,19	0,86	1,35	24	0,005
CAS10	0,54	0,49	0,58	0,68	0	< 0,001
CAS20	0,55	0,52	0,58	0,42	0	< 0,001
R_g	200,9	193,01	208,76	0,30	144	< 0,001
R_n	146,2	135,26	157,25	0,42	144	< 0,001
LE	82,8	68,39	97,31	0,61	144	< 0,001
H	46,3	48,61	44,05	0,73	144	< 0,001
G	6,9	6,37	7,43	2,70	144	< 0,001
ET	2,9	2,42	3,47	0,67	144	< 0,001

no déficit de pressão de vapor (DPV ; Figura 2c) entre as estações seca e chuvosa (Tabela 2). A umidade relativa do ar foi 9% maior durante a estação chuvosa, enquanto que o DPV foi 19% maior durante a estação seca. A variação sazonal do DPV seguiu o padrão inverso da tendência sazonal da PPT, da UR e do conteúdo de água no solo, com correlações negativas (Tabela 3). O pico do DPV ocorreu em setembro, com menores valores de UR e conteúdo de água no solo. Essas tendências sazonais foram compatíveis com uma variedade de áreas nativas tropicais na bacia Amazônica (da Rocha *et al.*, 2004; da Rocha *et al.*, 2009; Biudes *et al.*, 2015), no Cerrado (da Rocha *et al.*, 2009; Fausto *et al.*, 2014; Biudes *et al.*, 2015), e no Pantanal (Biudes *et al.*, 2009, 2012, 2014, 2015).

A média anual da radiação solar global incidente (R_g) foi $200,9 W m^{-2}$, sendo 4% maior durante a estação chuvosa em relação à estação seca. Os maiores valores mensais de R_g foram obtidos no final da estação seca e início da chuvosa (Figura 2d). Em geral, a nebulosidade durante a estação chuvosa em baixas latitudes e os aerossóis oriundos da queima de biomassa na estação seca podem reduzir a quantidade de radiação solar incidente na superfície do solo (Reinolds *et al.*, 1975; Li *et al.*, 1995; Hilker *et al.*, 2012). Dessa forma, os maiores valores de R_g que ocorreram na transição entre a estação seca e chuvosa, provavelmente, foram devido ao efeito combinado do fator astronômico, observado pela declinação negativa, e a ocorrência das primeiras chuvas da estação chuvosa na área de estudo, as quais diminuem os aerossóis da atmosfera.

3.2. Análise do balanço de energia

A média anual do saldo de radiação (R_n) foi $146,3 W m^{-2}$, sendo 8% maior durante a estação chuvosa em relação à estação seca. Embora, o R_n tenha apresentado

padrão semelhante ao da R_g (Tabela 3) e com valores ligeiramente maiores no final da estação seca e início da estação chuvosa, a amplitude anual relativa do R_n , *i.e.* a máxima média menos a mínima média mensal dividida pela média anual, foi maior que do R_g (Figuras 2d e 3a; Tabela 2).

Apesar de não ter sido avaliado o índice de área foliar e o albedo da área de estudo no presente trabalho, a maior amplitude relativa do R_n em relação ao R_g pode ser atribuída às essas variáveis. O stress hídrico e o fotoperíodo são indicadas como as principais variáveis para a variação do índice de área foliar nos trópicos (Rivera *et al.*, 2002). A diminuição da cobertura verde durante a estação seca influencia no aumento do albedo da superfície (Fausto *et al.*, 2014), o qual é um importante componente para o cômputo do saldo de radiação. Valores elevados de albedo são associados às superfícies lisas, secas e com cores claras, enquanto que baixos valores de albedo estão associados às superfícies rugosas, úmidas e com coloração escura (Silva *et al.*, 2011). Além da coloração mais escura da vegetação durante a estação chuvosa, a maior quantidade de folhas absorve mais radiação eletromagnética pelos pigmentos fotossintetizantes e pelas múltiplas reflexões no interior do dossel (Ponzoni, 2002), diminuindo o albedo da superfície e aumentando o saldo de radiação. Assim, não só a maior quantidade de radiação solar incidente que atinge a superfície acarretou em maior quantidade de energia disponível para o ecossistema, mas também a característica óptica da superfície influenciou consideravelmente.

O fluxo de calor latente (LE) foi maior que o fluxo de calor sensível (H) e os dois se diferenciaram significativamente entre as estações (Figura 3; Tabela 2). O fluxo de calor no solo (G) também se diferenciou entre as estações, mas seus valores próximos a zero impossibilitaram sua

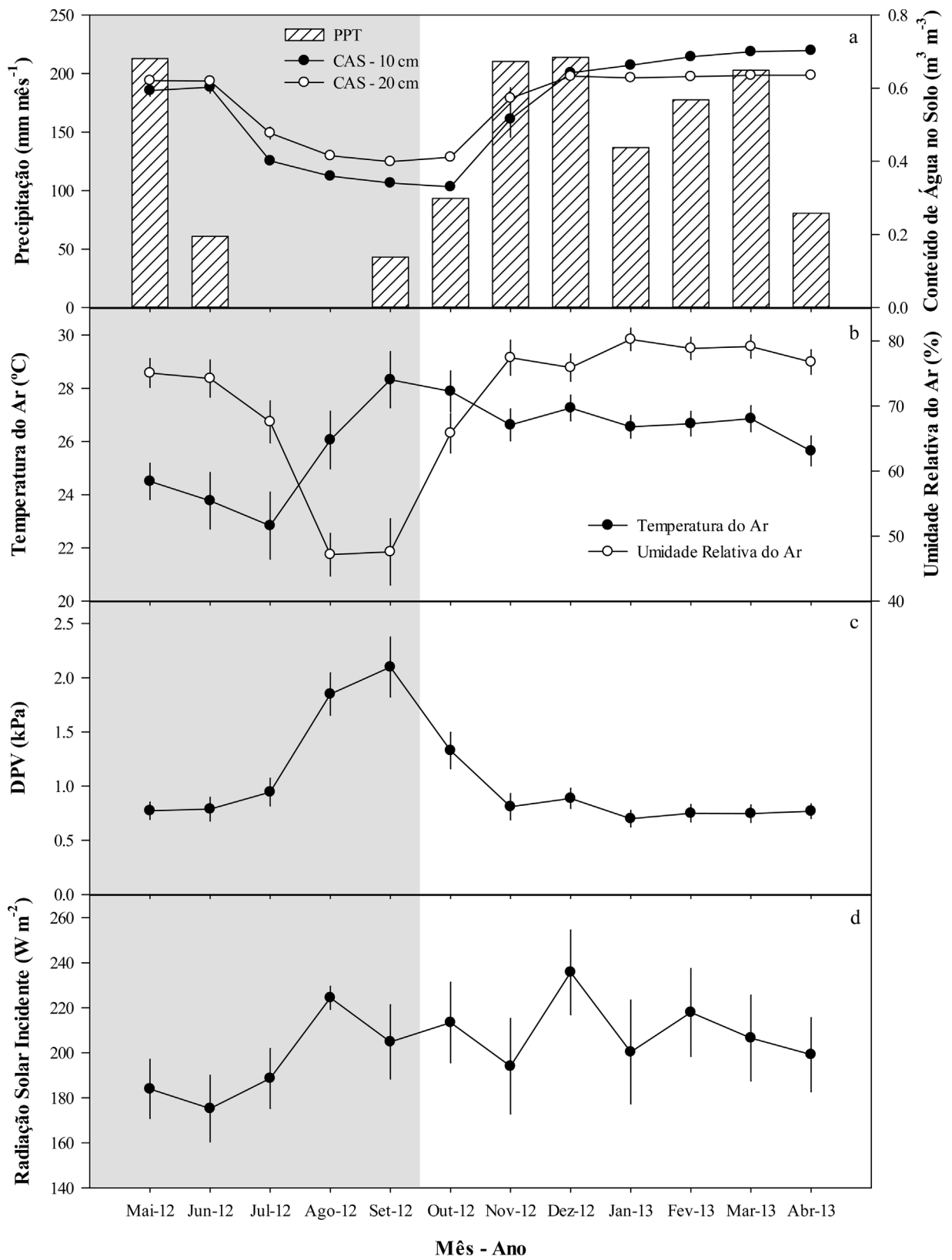


Figura 2 - Precipitação mensal e média mensal do conteúdo de água no solo a 10 e 20 cm de profundidade (a), temperatura do ar e umidade relativa do ar média mensal (b) déficit de pressão de vapor d'água do ar média mensal (c) e radiação solar incidente média mensal (d) em área arbustiva no Pantanal Matogrossense. As barras de erro representam o intervalo de confiança de $\pm 95\%$ das medidas obtidas por bootstrapping de 1000 iterações das reamostragens aleatórias com substituição. A faixa acinzentada representa delimita a estação seca da região de estudo.

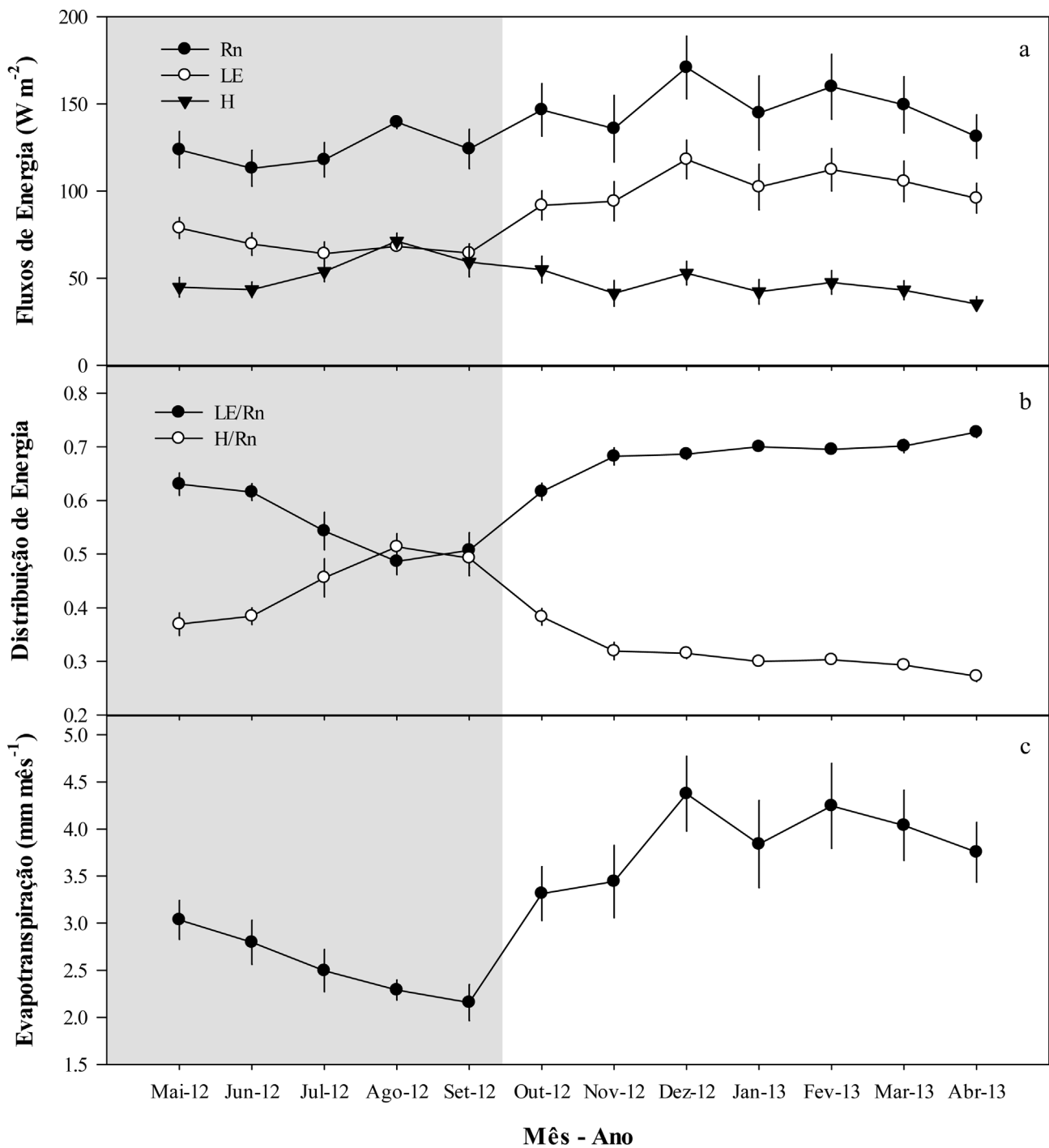


Figura 3 - Média mensal do saldo de radiação (Rn), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H) (a), média mensal da distribuição do saldo de radiação em fluxo de calor latente (LE/Rn) e sensível (H/Rn) (b) e média mensal da evapotranspiração (c) em área arbustiva no Pantanal Mato-grossense. As barras de erro representam o intervalo de confiança de $\pm 95\%$ das medidas obtidas por bootstrapping de 1000 iterações das reamostragens aleatórias com substituição. A faixa acinzentada representa delimita a estação seca da região de estudo.

visualização na Figura 3a, portanto foi retirado. O LE foi em média de 21% maior durante a estação chuvosa. Os maiores valores de LE durante a estação chuvosa estiveram relacionados com a maior disponibilidade de energia, observado pela forte correlação com R_g e R_n , e com a maior disponibilidade de água no ambiente, observado pela corre-

lação forte correlação com a PPT e baixa correlação com o conteúdo de água no solo (Tabela 3). Isso significa que LE na área arbustiva do Pantanal Mato-grossense possui relativamente grande limitação quanto à disponibilidade de energia e água no ecossistema. Além disso, mesmo que a água não seja limitante, a radiação tende a limitar a quanti-

Tabela 3 - Tabela de correlação de Spearman entre a precipitação (PPT), temperatura do ar (*T*), umidade relativa do ar (UR), déficit de pressão de vapor (*DPV*), conteúdo de água no solo a 10cm de profundidade (CAS10), conteúdo de água no solo a 20 cm de profundidade (CAS20), radiação solar incidente (*Rg*), saldo de radiação (*Rn*), fluxo de calor latente (*LE*), fluxo de calor sensível (*H*), fluxo de calor no solo (*G*) e a evapotranspiração (*ET*) na área arbustiva inundável no Pantanal Matogrossense.

Variável	PPT	<i>T</i>	UR	<i>DPV</i>	CAS10	CAS20	<i>Rg</i>	<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>
<i>T</i>	0,30										
UR	0,6*	-0,45***									
<i>DPV</i>	-0,50	0,67***	-0,95***								
CAS10	0,40	-0,13*	0,60***	-0,51***							
CAS20	0,56	-0,12*	0,62***	-0,52***	0,86***						
<i>Rg</i>	0,11	0,56***	-0,53***	0,60***	-0,03	-0,04					
<i>Rn</i>	0,51	0,57***	-0,35***	0,47***	0,11*	0,14**	0,94***				
<i>LE</i>	0,75***	0,50***	0,00	0,18***	0,37***	0,42***	0,71***	0,86***			
<i>H</i>	-0,40*	0,47***	-0,75***	0,73***	-0,36***	-0,36***	0,85***	0,73***	0,35***		
<i>G</i>	-0,01	0,13*	-0,13*	0,15**	0,23*	0,15**	0,27***	0,30***	0,35***	0,14**	
<i>ET</i>	0,74***	0,41***	0,07	0,09	0,45***	0,50***	0,66***	0,82***	0,98***	0,29***	0,38***

(*) p-valor < 0,05; (**) p-valor < 0,01; (***) p-valor < 0,001.

dade de *LE* (Biudes *et al.*, 2009; da Rocha *et al.*, 2009; Rodrigues *et al.*, 2014).

O *H* foi em média 5% maior durante a estação seca (Tabela 2). Assim como *LE*, o *H* também foi fortemente correlacionado com a disponibilidade de energia (*Rg* e *Rn*) na área de estudo (Tabela 3). No entanto, *H* seguiu o padrão inverso da disponibilidade de água no ambiente, com correlação negativa com a PPT e o conteúdo de água no solo e com forte correlação positiva com o *DPV* (Tabela 3). Em ambientes com predominância de vegetação arbustiva, como na área de estudo, a vegetação não mantém altas taxas da evapotranspiração com baixa disponibilidade de água no solo e alta demanda atmosférica, o que provoca diminuição do *LE* e aumento de *H* (Biudes *et al.*, 2009; da Rocha *et al.*, 2009; Rodrigues *et al.*, 2014; Biudes *et al.*, 2015).

O *Rn* foi destinado prioritariamente ao *LE* (64,1%), seguido ao *H* (35,8%) e quase zero ao fluxo de calor no solo (0,1%). A distribuição do saldo de radiação em fluxo de calor latente (*LE/Rn*) e sensível (*H/Rn*) variaram significativamente entre as estações (Figura 2b; Tabela 2). *LE/Rn* diminuiu durante a estação seca, com seu mínimo em agosto e altos valores entre novembro e abril. O *H/Rn* apresentou padrão inverso ao *LE/Rn*, com máximo em agosto e baixos valores entre novembro e abril. Em agosto houve coincidência da baixa disponibilidade de energia e a baixa disponibilidade hídrica no solo, e entre dezembro e maio ocorreu a inundação na área de estudo, observado pela saturação do conteúdo de água no solo (Figura 2a). Esses padrões sugerem que a tendência temporal na distribuição de *Rn* em *LE* e *H* foram limitados pela disponibilidade de energia e água (Biudes *et al.*, 2009; Rodrigues *et al.*, 2014).

A evapotranspiração (*ET*) apresentou forte tendência sazonal, sendo 20% maior durante a estação chuvosa (Figura 3c, Tabelas 2). A *ET* apresentou maior correlação com o conteúdo de água no solo medido a 20 cm que o medido a

10 cm (Tabela 3), isso indica que a vegetação de *Combretum lanceolatum* pode absorver água mais profundamente que na imediata superfície (Calder, 1998; Yang *et al.*, 2000). Assim como ocorreu com *LE*, o declínio de *ET* durante a estação seca foi também devido à diminuição da energia disponível e da disponibilidade hídrica no solo, quando ocorreu menor *Rg*, *Rn*, PPT e conteúdo de água do solo e maior demanda evaporativa (Tabela 3). Além da diminuição da evaporação da água do solo durante a estação seca, devido à baixa disponibilidade de água no solo, a *ET* também diminuiu pela diminuição da atividade fotossintética líquida. Finger (2012) observou uma redução acentuada de 56,6% da fotossíntese líquida e 58,6% da condutância estomática da espécie dominante da área de estudo, o que indica redução na transpiração.

4. Conclusões

Os componentes do balanço de energia apresentaram forte sazonalidade na área de estudo. A pronunciada tendência sazonal com maior *LE* durante a estação chuvosa e maior *H* durante a estação seca sugere que ambiente é limitado pela disponibilidade de energia e água no solo. Além disso, houve redução da *ET* durante estação seca em decorrência da maior partição de *Rn* em *H* devido à baixa umidade do solo e à redução na transpiração da espécie predominante na área de estudo.

Agradecimentos

A pesquisa foi apoiada pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Programa de Pós Graduação em Física Ambiental (PPGFA/IF/UFMT), e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES – Bolsas, Processo nº 9750/13-4 e nº 9768/13-0), e financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico (CNPq – MCT/CNPq/CT Infra-CT Energia 2006; processo nº 620082/2006-2), e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT – PRONEX 2009, processo nº 823971/2009; FAPEMAT – UNIVERSAL 2012, processo nº 331763/2012).

Referências

- ALVES, L.M. Clima da Região Centro-Oeste do Brasil. In: Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, N. J., Silva, M. G. J., Silva Dias, M. A. F. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. Ed. Oficina de Textos, 2009, 1ª ed. 236-241p., 2009.
- ARIEIRA, J.; NUNES DA CUNHA, C. Fitossociologia de uma floresta inundável monodominante de *Vochysia divergens* Pohl (Vochysiaceae), no Pantanal Norte, MT, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v.20, n.3, p.569-580, 2006.
- ARIEIRA, J.; KARSSSENBERG, D.; DE JONG, S.M.; ADDINK, E.A.; COUTO, E.G.; NUNES DA CUNHA, C.; SKØIEN, J.O. Integrating field sampling, geostatistics and remote sensing to map wetland vegetation in the Pantanal, Brazil. **Biogeosciences**, v.8, n.1, p.667-686, 2011.
- AZEVEDO, A.A.; SAITO, C.H. O perfil dos desmatamentos em Mato Grosso, após implementação do licenciamento ambiental em propriedades rurais. **CERNE**, v.19, n.1, p.111-122, 2013.
- BILLESBACH, D.P.; ARKEBAUER, T.J. First long-term, direct measurements of evapotranspiration and surface water balance in the Nebraska SandHills. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.156, p.104-110, 2012.
- BIUDES, M.S.; CAMPELO JÚNIOR, J.H.; NOGUEIRA, J.S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, p.135-143, 2009.
- BIUDES, M.S.; NOGUEIRA, J.S.; DALMAGRO, H.J.; MACHADO, N.G.; DANELICHEN, V.H.M.; SOUZA, M.C. Mudança no microclima provocada pela conversão de uma floresta de cambará em pastagem no norte do Pantanal. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v.10, p.61-68, 2012.
- BIUDES, M.S.; MACHADO, N.G.; DANELICHEN, V.H.M.; SOUZA, M.C.; VOURLITIS, G.L.; NOGUEIRA, J.S. Ground and remote sensing-based measurements of leaf area index in a transitional forest and seasonal flooded forest in Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v.58, n.6., p.1181-1193, 2014.
- BIUDES, M.S.; VOURLITIS, G.L.; MACHADO, N.G.; ARRUDA, P.H.Z.; NEVES, G.A.R.; LOBO, F.A.; NEALE, C.M.U.; NOGUEIRA, J.S. Patterns of energy Exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.202, p.112-124, 2015.
- CALDER, I.A. Water use by forests, limits and controls. **Tree Physiology**, v.18, p.625-631, 1998.
- CARVALHO, L.M.V.; JONES, C. Zona de Convergência do Atlântico Sul. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.J.; SILVA DIAS, M.A.F. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. Ed. Oficina de Textos, 2009, 1ª ed. 96-109p., 2009.
- CORINGA, E.A.O.; COUTO, E.G.; PEREZ, X.L.O.; TORRADO, P.V. Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. **Acta Amazonica**, v.42, n.1, p.465-472, 2012.
- DA ROCHA, H.R.; GOULDEN, M.L.; MILLER, S.D.; MENTON, M.C.; PINTO, L.D.V.O.; FREITAS, H.C.; FIGUEIRA, A.M.S. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. **Ecological Applications**, v.14, p.22-32, 2004.
- DA ROCHA, H.R.; MANZI, A.O.; CABRAL, O.M.; MILLER, S.D.; GOULDEN, M.L.; SALESKA, S.R.; COUPE, N.R.; WOFYSY, S.C.; BORMA, L.S.; ARTAXO, P.; VOURLITIS, G.L.; NOGUEIRA, J.S.; CARDOSO, F.L.; NOBRE, A.D.; KRUIJT, B.; FREITAS, H.C.; VON RANDOW, C.; AGUIAR, R.G.; MAIA, J.F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v.114, n.G00B12, p.1-8, 2009.
- DANELICHEN, V.H.M.; MACHADO, N.G.; SOUZA, M.C.; BIUDES, M.S. TRMM Satellite performance in estimating rainfall over the Midwest region of Brazil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.9, n.2, p.22-31, 2013.
- DICKEN, U., COHEN, S., TANNY, J. Examination of the Bowen ratio energy balance technique for evapotranspiration estimates in screenhouses. **Biosystems Engineering**, v.114, p.397-405, 2013.
- DREXLER, J.Z.; SNYDER, R.L.; SPANO, D.; PAW U, K.T. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. **Hydrological Processes**, v.18, n.11, p.2071-2101, 2004.
- EFRON, B.; TIBSHIRANI, R.J. **An introduction to the bootstrap**. Chapman & Hall, New York. p. 443, 1993.
- FANTIN-CRUZ, I.; GIRARD, P.; ZEILHOFER, P.; COLLISCHONN, W.; NUNES DA CUNHA, C. Unidades fitofisionômicas em mesoescala no Pantanal Norte e suas relações com a geomorfologia. **Biota Neotropica**, v.10, n.2, p.31-38, 2010.
- FAUSTO, M.A.; MACHADO, N.G.; NOGUEIRA, J.S.; BIUDES, M.S. Net radiation estimated by remote sensing in Cerrado areas in the Upper Paraguay River Basin. **Journal of Applied Remote Sensing**, v.8, p.083541, 2014.
- FEARNSIDE, P.M. Deforestation Control in Mato Grosso: A New Model for Slowing the Loss of Brazil's Amazon Forest. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v.32, n.5, p.343-345, 2003.
- FEARNISIDE, F. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências. **Megadiversidade**, v.1, n.1, p.113-123, 2005.
- FINGER, A. **Variação sazonal do potencial fotossintético em *Combretum lanceolatum* Pohl**. 2012. 64p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá. 2012.
- GRACE, J.; MALHI, Y.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.C.; MEIR, P.; MIRANDA, H.S. The Use of Eddy Covariance to Infer the Net Carbon Dioxide Uptake of Brazilian Rain Forest. **Global Change Biology**, v.2, p.209-217, 1996.
- HAMILTON, S.K.; SIPPEL, S.J.; MELACK, J.M. Inundation patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive microwave remote sensing. **Archiv für Hydrobiologie**, v.137, n.1, p.1-23, 1996.
- HARDY, D.R.; VUILLE, M.; BRAUN, C.; KEIMIG, F.; BRADLEY, R.S. Annual and Daily Meteorological Cycles

- at High Altitude on a Tropical Mountain. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.79, n.9, p.1899-1913, 1998.
- HASLER, N.; AVISSAR, R. What controls evapotranspiration in the Amazon Basin? **Journal of Hydrometeorology**, v.8, p.380-395, 2007.
- HILKER, T.; LYAPUSTIN, A.I.; TUCKER, C.J.; SELLERS, P.J.; HALL, F.G.; WANG, Y. Remote sensing of tropical ecosystems: Atmospheric correction and cloud masking matter. **Remote Sensing of Environment**, v.127, p.370-384, 2012.
- HU, S.; ZHAO, C.; LI, J.; WANG, F.; CHEN, Y. Discussion and reassessment of the method used for accepting or rejecting data observed by a Bowen ratio system. **Hydrological Processes**, v.28, n.15, p.4506-4510, 2013.
- JUNK, W.J.; BAYLEY, P.B.; SPARKS, R.E. The flood pulse concept in river - floodplains systems. p. 110-127. In: DODGE, D.P. (ed.). Proceedings International Large River Symposium (LARS), **Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences**, Ottawa, v.106, p.110-127, 1989.
- JUNK, W.J.; BROWN, M.; CAMPBELL, I.C.; FINLAYSON, M.; GOPAL, B.; RAMBERG, L.; WARNER, B.G. The comparative biodiversity of seven globally important wetlands: A synthesis. **Aquatic Sciences**, v.68, n.3, p.400-414, 2006.
- JUNK, W.J.; NUNES DA CUNHA, C. Pantanal: A large South American wetland at a crossroads. **Ecological Engineering**, v.24, p.391-401, 2005.
- KIRK, G. **The Biogeochemistry of Submerged Soils**. John Wiley & Sons, Chichester, 2004.
- KOUSKY, V.E.; KAYANO, M.T. Principal models of outgoing longwave radiation and 250 Mb circulation for the South American sector. **Journal of Climate**, v.7, p.1131-1143, 1994.
- LI, Z.; BARKER, H.; MOREAU, L. The variable effect of clouds on atmospheric absorption of solar radiation. **Nature**, v.376, p.486-490, 1995.
- MACHADO, N.G.; SANCHES, L.; AQUINO, A.M.; SILVA, L.B.; NOVAIS, J.W.Z.; BIUDES, M.S. Growth rhythm of *Vochysia divergens* Pohl (Vochysiaceae) in the Northern Pantanal. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, 2015a. (IN PRESS).
- MACHADO, N.G.; SANCHES, L.; SILVA, L.B.; NOVAIS, J.W.Z.; AQUINO, A.M.; BIUDES, M.S.; PINTO-JUNIOR, O.B.; NOGUEIRA, J.S. Soil nutrients and vegetation structure in a neotropical seasonal wetland. **Applied Ecology and Environmental Research**, v.13, p.289-305, 2015b.
- MARENGO, J.; CORNEJO, A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C.; SEA, W. Cold Surges in Tropical and Extratropical South America: The Strong Event in June 1994. **Monthly Weather Review**, v.125, p.2759-2786, 1997.
- NUNES DA CUNHA, C.; JUNK, W.J. Distribution of wood plant communities along the flood gradient in the Pantanal of Poconé, Mato Grosso, Brazil. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**, v.27, p.63-70, 2001.
- ORTEGA-FARIAS, S.O.; CUENCA, R.H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.81, p.131-143, 1996.
- PARMENTER, F. A Southern Hemisphere cold front passage at the equator. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.57; p.1435-1440, 1976.
- PENHA, J.M.; da SILVA, C.J.; BIANCHINI, I. Productivity of the aquatic macrophytes *Pontederia lanceolata* Nutt. (Pontederiaceae) on the floodplains of the Pantanal Matogrossense, Brazil. **Wetland Ecology and Management**, v.7, p.155-163, 1999.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBANEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, p.141-150, 1999.
- PONZONI, F.J. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a mata atlântica**. Capítulo 8. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE - 8984-pud/62. São José dos Campos. 28p., 2002
- REYNOLDS, D.W.; HAAR, T.H.V.; COX, S.K. The Effect of Solar Radiation Absorption in the Tropical Troposphere. **Journal of Applied Meteorology**, v.14, n.4, p.433-444, 1975.
- RIVERA, G.; ELLIOT, S.; CALDAS, L.S.; NICOLOSSI, G.; CORADIN, V.T.R.; BORCHERT, R. Increasing day-length induces spring flushing of tropical dry forest trees in the absence of rain. **Trees**, v.16, n.7, p.445-456, 2002.
- RODRIGUES, T.R.; VOURLITIS, G.L.; LOBO, F.A.; OLIVEIRA, R.G.; NOGUEIRA, J.S. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical savanna ecosystem of south central Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v.119, n.1, p.1-13, 2014.
- SILVA, B.B.; SILVA, S.T.A.; GOMES, H.B. Balanço de Radiação no Perímetro Irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens Orbitais. **Revista Caatinga**, v.24, n.3, p.143-152, 2011.
- UNLAND, H.E.; HOUSER, P.R.; SHUTTLEWORTH, W.J.; YANG, Z.L. Surface flux measurement and modelling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.82, p.119-153, 1996.
- VIRJI, H. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud wins. **Monthly Weather Review**, v.109, p.549-610, 1981.
- WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic Press, 2011. 676p.
- YANG, J.; LI, B.; LIU, S. A large weighing lysimeter for evapotranspiration and soil-water-groundwater exchange studies. **Hydrological Processes**, v.14, p.1887-1897, 2000.