



## Fluxos de radiação, energia, CO<sub>2</sub> e vapor d'água em uma área de caatinga em regeneração

Wilis Neiva Pires<sup>1</sup>, Magna Soelma Beserra de Moura<sup>2(\*)</sup>, Luciana Sandra Bastos de Souza<sup>3</sup>, Thieres George Freire da Silva<sup>3</sup>, Herica Fernanda de Sousa Carvalho<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mestre, Engenharia Agrícola, UNIVASF, Juazeiro, BA, w.pires12@hotmail.com

<sup>2</sup>Pesquisadora, Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, magna.moura@embrapa.br

<sup>3</sup>Professor (a), UAST/UFRPE, Serra Talhada, PE, sanddrabastos@hotmail.com, thieres\_freire@yahoo.com.br

<sup>4</sup>Bolsista DTI, CNPq, Embrapa Semiárido, Petrolina-PE

(\*) Autor para correspondência

### INFORMAÇÕES

#### História do artigo:

Recebido em 16 de Junho de 2017

Aceito em 10 de agosto de 2017

#### Termos para indexação:

correlações turbulentas  
índice de cobertura vegetal  
precipitação

### RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de avaliar os fluxos de radiação, energia, gás carbônico e vapor d'água em uma área de caatinga em regeneração na Chapada do Araripe, Pernambuco. Para tanto, dados micrometeorológicos foram obtidos durante o ano de 2013, com base em medições efetuadas por meio de sensores eletrônicos instalados em uma torre micrometeorológica de 8 metros de altura, localizados em uma área com vegetação de caatinga degradada, no Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA, município de Araripina, PE. Os resultados mostraram que o ano de 2013 na região do Araripe pernambucano apresentou precipitação inferior à média histórica, influenciando no desenvolvimento da vegetação, e por sua vez, em suas relações com a atmosfera. 41% da radiação solar incidente correspondem à radiação fotossinteticamente ativa (PAR); o coeficiente de reflexão para ondas curtas (albedo) variou de 11 a 16,5% e o índice de área foliar entre 0,3 e 2,1 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, 45% do saldo de radiação foi utilizado para aquecimento na forma de fluxo de calor sensível (H), com fechamento do balanço de energia igual a 80%. O fluxo de calor no solo (G) representou apenas 1% do saldo de radiação. Todas essas informações contribuíram para que a assimilação de carbono na caatinga degradada seja altamente dependente da ocorrência de chuvas, portando-se, como sumidouro de CO<sub>2</sub> atmosférico durante o primeiro semestre do ano e como fonte no segundo.

© 2017 SBAgro. Todos os direitos reservados.

### INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro possui uma área de 1.561.177,8 km<sup>2</sup>, compreende cerca de 18,27% do território nacional, deste total, 879.394,15 km<sup>2</sup> compreendem a região semiárida, que tem como característica marcante a ocorrência

de secas (IBGE, 2015). Nesta região, os elementos meteorológicos com valores elevados de insolação e evaporação, associados à ocorrência de índices de precipitação pluvial entre 500 e 800 mm são os principais fatores associados aos altos riscos de secas observados (MOURA et al., 2007).

Sob essas condições, a Caatinga apresenta alta capa-

cidade de resiliência, e, durante o período chuvoso, após condições de estresse hídrico extremo as espécies respondem rapidamente às modificações ambientais, com formação de biomassa foliar e conseqüentemente incrementos na assimilação de carbono (OLIVEIRA et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2008; SANTOS et al., 2012; SOUZA et al., 2015a).

Estudos micrometeorológicos sobre componentes do balanço de radiação (SOUZA et al., 2015b), balanço de energia e a evapotranspiração (TEIXEIRA et al., 2008; TEIXEIRA, 2010), gás carbônico (OLIVEIRA et al., 2006; SANTOS et al., 2012) e a calibração de modelos dinâmicos de vegetação (REZENDE et al., 2013; CUNHA, ALVALÁ, OLIVEIRA, 2013) têm demonstrado a importância de se estudar as relações vegetação x atmosfera no Bioma Caatinga.

No entanto, todas estas informações foram geradas a partir de dados obtidos em uma área de Caatinga preservada e pouco se conhece sobre a magnitude e o comportamento dos fluxos de CO<sub>2</sub>, energia e vapor d'água, em áreas que passaram por algum processo de antropização, e tiveram sua vegetação original alterada, que já totalizam 46% do total de área do Bioma Caatinga (MMA, 2015). Dentre as áreas de Caatinga mais alteradas está a Chapada do Araripe, onde as plantas têm sido utilizadas principalmente para fins madeireiros e energéticos (SÁ et al., 2011).

Estudos voltados para determinação e avaliação dos fluxos de radiação e energia, CO<sub>2</sub> e de vapor d'água (evapotranspiração) em áreas de Caatinga degradada ou em processo de regeneração são inexistentes ou raros, sendo este o objetivo deste estudo.

## Material e métodos

Este estudo foi conduzido em uma área com vegetação de Caatinga degradada, localizada no Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA (7°27' S; 40°24' W e 828 m), Araripe, PE. O clima local é classificado como BShw', ou seja, semiárido, com precipitação média em torno de 752 mm anuais, temperatura média anual do ar de 24 °C, evaporação de 1.127 mm ano<sup>-1</sup> e umidade relativa do ar em torno de 55,2%.

A área experimental abrange cerca de 4 ha, e, encontra-se degradada pelo cultivo, em anos anteriores, de feijão, milho, mandioca e sorgo, sendo que as últimas culturas foram semeadas em 1997. Até 2009 a área foi mantida cerca da, porém, havia pastejo animal, principalmente durante o período chuvoso. Atualmente, a mesma encontra-se em regeneração após isolamento realizado em 2010, e sua área comporta uma vegetação de porte arbustivo-herbáceo, onde se verifica a presença das espécies *Angico* (*Mimosa colubrina* Vell.), *Catingueira* (*Poincianella microphylla*), *Maracujá da Caatinga* (*Passiflora cincinnata*), *Aristida* sp., dentre outras, que exibem uma altura média em torno de 1,2 metros.

Dados micrometeorológicos foram obtidos para o período de 01 de janeiro à 31 de dezembro de 2013, por meio de sensores eletrônicos instalados em uma torre micrometeorológica de 8 metros de altura, localizada no centro da área experimental. Foram utilizados dois sistemas de medidas, sendo um em alta frequência (fluxos de CO<sub>2</sub>, vapor d'água e calor sensível) e outro em baixa frequência (componentes do balanço de radiação, radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela vegetação, temperatura e umidade relativa do ar e precipitação). Ambos os sistemas ligados a um datalogger modelo CR1000 e um multiplexador AM 16x32 (Campbell Scientific INC., Logan, Utah, EUA).

Para determinação dos componentes do balanço de radiação foi utilizado o CNR1 (Net radiometer, Kipp & Zonen, Delft, Netherlands), que realizou medida da radiação de ondas curtas incidente (R<sub>g</sub>, W m<sup>-2</sup>) e refletida (R<sub>r</sub>, W m<sup>-2</sup>), radiação de onda longa incidente da atmosfera (R<sub>a</sub>, W m<sup>-2</sup>) e emitida da superfície (R<sub>s</sub>, W m<sup>-2</sup>), por meio de medidas dessas componentes determinou-se o saldo de radiação total (R<sub>n</sub>, W m<sup>-2</sup>), saldo de ondas curtas (BOC, W m<sup>-2</sup>), ondas longas (BOL, W m<sup>-2</sup>) e o albedo (α).

Dois sensores LI-190SA (Quantum sensor, Li-Cor, Nebraska, USA) foram utilizados para medir a densidade de fluxo da radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR<sub>i</sub>, μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) e refletida (PAR<sub>r</sub>, μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) pela superfície. Além destes, por meio de dois sensores quantum lineares LI-191SA (Quantum sensor, Li-Cor, Nebraska, USA), foram medidas a radiação fotossinteticamente ativa ao nível do solo (PAR<sub>b</sub>, μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Com isso, foram calculadas as frações da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (fPAR<sub>i</sub>) e absorvida (fPAR<sub>a</sub>) pela vegetação, segundo as Equações 1 e 2, respectivamente, descritas por Gower, Kucharik e Norman (1999):

$$fPAR_i = 1 - \frac{PAR_b}{PAR_i} \quad (1)$$

$$fPAR_a = \frac{[(PAR_i - PAR_r) - (PAR_b - PAR_{rb})]}{PAR_i} \quad (2)$$

em que: PAR<sub>rb</sub> é a radiação fotossinteticamente ativa refletida abaixo do dossel, nesse caso considerada nula, e os outros termos já foram definidos.

Para estimativa do índice de cobertura vegetal (ICV) utilizou-se a metodologia baseada na interceptação da luz, conforme descrito por Decagon (2001). Foram utilizados os valores medidos por volta do meio dia da radiação fotossinteticamente ativa incidente acima (PAR<sub>i</sub>) e abaixo do dossel (PAR<sub>b</sub>) durante todo o período do ano de 2013.

O balanço de energia é composto pelos fluxos de calor latente (LE), de calor sensível (H), e do calor no solo (G), além de fluxos associados à absorção de calor no volume ocupado pela vegetação e da energia utilizada na fotossíntese, estas duas últimas foram desconsideradas no cômputo

to do balanço de energia (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). E, assim o modelo matemático proposto para o balanço de energia foi descrita conforme a Equação 3:

$$R_n - G - LE - H = 0 \quad (3)$$

Os valores de  $R_n$  foram obtidos a partir do sensor CNR1 (Kipp & Zonen B.V., Delft, Netherlands), e o fluxo de calor no solo ( $G$ ) foi medido por meio de dois fluxímetros (HFT3-REBS, Campbell Scientific, Inc Logan, Utah, EUA), instalados a 0,06 metros de profundidade em diferentes posições no solo. Os outros termos da Equação 3 foram obtidos pelo método das covariâncias dos vórtices turbulentos.

O método da covariância dos vórtices turbulentos foi utilizado para obtenção dos fluxos de calor latente ou de vapor d'água ( $LE$ ) e fluxo de calor sensível ( $H$ ), bem como a determinação dos fluxos de dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Para efetuar medidas em alta frequência das concentrações de vapor de água e de  $CO_2$  utilizou-se um analisador de gás ao infravermelho de caminho aberto (LI-7500, Licor, Lincoln, NE, EUA); já as flutuações da temperatura e velocidade do vento nas três direções ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) foram obtidas por meio de um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3, Campbell Scientific, Logan, UT, EUA). Os dados em alta frequência das concentrações de  $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $H$  foram utilizados para cálculos dos fluxos médios de 30 minutos utilizando-se o software Alteddy, versão 3.6 (Alterra, University of Wageningen, Netherlands).

Os dados micrometeorológicos obtidos em escala de 30 minutos foram convertidos em médias e, ou totais diários, e posteriormente computados como valores médios mensais, seguidos de desvio padrão.

## Resultados e discussão

Durante o ano de 2013 foram registrados apenas 507 mm ano<sup>-1</sup> de precipitação pluviométrica, o qual foi inferior ao da normal climatológica 987,3 mm ano<sup>-1</sup> (PAZ, 1990). Cerca de 70% do total da precipitação pluviométrica ocorreram no primeiro semestre (janeiro a junho), enquanto o segundo semestre, caracteristicamente seco, foi marcado pela ocorrência de 68 mm no mês de julho e 54 mm em dezembro (Figura 1). As condições ambientais de temperatura ( $Tar$ ) e a umidade relativa ( $UR$ ) do ar apresentaram valores médios anuais em torno de 23,49 °C e 62,43%, com variações entre 21,25 e 24,53 °C e de 50% a 70%, para a temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente. Entretanto, a variação da média mensal do déficit de pressão de vapor ( $DPV$ ) oscilou entre 0,76 a 1,80 ± 0,33 kPa, com valor médio anual de 1,22 kPa.

Em relação a variável velocidade do vento, no primeiro semestre a média foi de 3,53 m s<sup>-1</sup>, enquanto que no segundo, foi de 5,10 m s<sup>-1</sup>; e de modo geral os valores médios, máximos e mínimos diários foram em torno de 4,28; 8,00 e 1,60 m s<sup>-1</sup> respectivamente para o período estudado.

Na Tabela 1, observa-se as médias mensais dos componentes do balanço de radiação para o ano de 2013. A radiação solar global incidente ( $R_g$ ) no primeiro semestre foi em média 19,50 MJ m<sup>-2</sup>, com valores mais baixos ocorrendo entre os meses de abril e maio, respectivamente iguais a 17,88 ± 4,04 MJ m<sup>-2</sup> e 17,93 ± 4,17 MJ m<sup>-2</sup>, enquanto no segundo semestre, a média foi de 22,52 MJ m<sup>-2</sup>, destacando o mês de setembro com valores mais elevados de incidência de radiação na área (26,70 ± 1,89 MJ m<sup>-2</sup>). Já o valor médio anual para essa variável foi de 21,01 MJ m<sup>-2</sup>.

A maior variabilidade da  $R_g$  se deu no primeiro se-

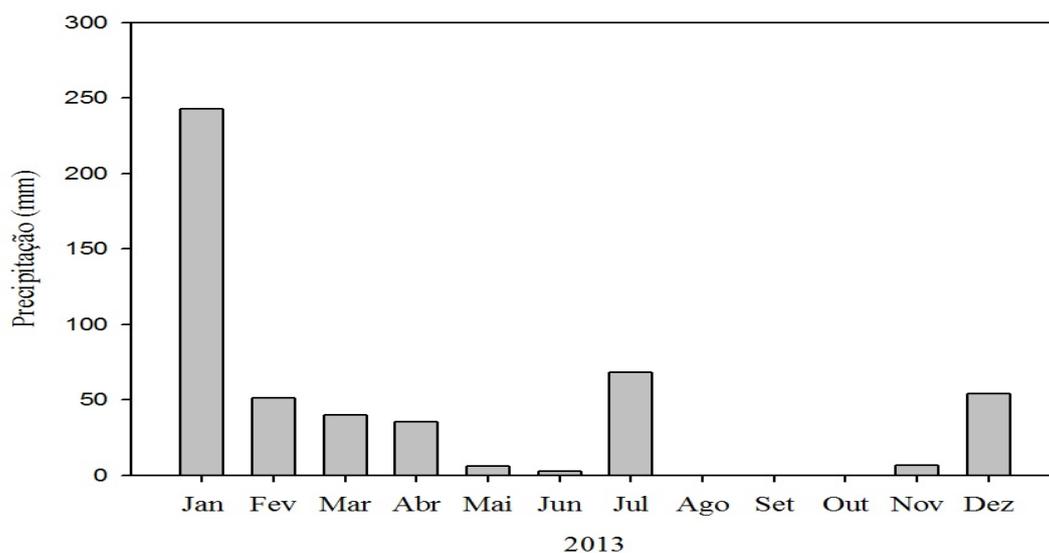


Figura 1. Valores médios mensais da precipitação pluviométrica em caatinga em regeneração, área experimental da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (IPA), em Araripina, PE, 2013.

**Tabela 1.** Médias mensais dos componentes do balanço de radiação em área de caatinga em regeneração, no município de Araripina-PE, durante o ano 2013.

Mês	Rg	Rr	Ra	Rs
	(MJ m <sup>-2</sup> )			
Janeiro	18,04 ± 6,08	2,36 ± 0,85	34,92 ± 1,10	39,26 ± 0,66
Fevereiro	23,68 ± 4,88	3,43 ± 0,71	33,54 ± 1,10	38,94 ± 0,45
Março	19,95 ± 5,10	3,03 ± 0,77	34,89 ± 1,39	39,23 ± 0,38
Abril	17,88 ± 4,04	2,83 ± 0,62	34,99 ± 1,31	38,57 ± 0,47
Mai	17,93 ± 4,17	2,87 ± 0,65	34,25 ± 1,62	38,01 ± 1,12
Junho	-	-	-	-
Julho	20,75 ± 3,14	2,79 ± 0,48	32,36 ± 1,76	37,85 ± 0,52
Agosto	-	-	-	-
Setembro	26,70 ± 1,89	3,96 ± 0,33	31,59 ± 1,02	39,64 ± 0,50
Outubro	23,93 ± 3,14	3,46 ± 0,51	33,02 ± 1,04	39,69 ± 0,46
Novembr o	21,78 ± 4,64	3,22 ± 0,70	33,71 ± 1,19	39,63 ± 0,62
Dezembro	19,44 ± 5,28	2,64 ± 0,89	34,32 ± 1,66	39,26 ± 0,54

\*Médias seguidas do desvio padrão (DP).

mestre, em que a maioria dos dias foi caracterizado com presença de nebulosidade, representado pelos meses com maiores volumes de chuva na região, apresentando assim um coeficiente de variação de 27,71%, enquanto no segundo semestre o coeficiente foi de 20% (Tabela 1).

No primeiro semestre (período chuvoso) a média do BOC foi de 16,59 MJ m<sup>-2</sup>, já para o segundo semestre a média foi de 19,31 MJ m<sup>-2</sup>, esse aumento de 14% entre os períodos está diretamente relacionado à Rg, já que entre o primeiro e segundo semestre a radiação global incidente teve um acréscimo de 13,42%. Esta diferença na magnitude de BOC está associada a menor nebulosidade durante o período seco, que culminam em maior transmissividade da atmosfera. Neste caso, os menores valores do balanço de ondas curtas foram observados em abril e maio (15,05 ± 3,43 e 15,06 ± 3,53 MJ m<sup>-2</sup>) enquanto que os maiores ocorreram em setembro e outubro (22,74 ± 1,57 e 20,47 ± 2,66 MJ m<sup>-2</sup>) (Tabela 1).

Analisando a radiação de ondas longas emitida pela atmosfera (Ra) e a emitida pela superfície (Rs) (Tabela 1), cuja contabilização resulta no saldo de ondas longas (BOL), pode-se verificar que, os valores médios mensais de BOL para o primeiro e segundo semestre de 2013, foram respectivamente iguais a -4,29 MJ m<sup>-2</sup> e -6,21 MJ m<sup>-2</sup>. Esse valor mais negativo de BOL no segundo semestre está relacionado com a diminuição (Ra) e aumento de (Rs).

Esse aumento de Rs pode estar associado a diminuição da cobertura vegetal da caatinga, característica comum expressada pela vegetação nesse período do ano, contribuindo para haver maior exposição do solo, conseqüentemente há aumento da temperatura do solo. Por sua vez, quanto

maior a temperatura do solo, maior será sua irradiação de onda longa, e por outro lado, quanto maior a temperatura da atmosfera, maior será a contra radiação atmosférica.

A interação entre a incidência de radiação e o ecossistema pode ser analisada por meio do coeficiente de reflexão ou albedo. Durante o período experimental o maior valor deste parâmetro climático foi observado entre os meses de abril e maio, média de 15,86 ± 0,49, e os menores valores ocorreu nos meses de janeiro e dezembro 12,95 ± 0,63 e 13,28 ± 1,80% respectivamente (Tabela 2). No geral a média foi de 14,58%, nessa área durante o ano de 2013.

Estes valores de albedo do presente estudo são próximos aos reportados por Teixeira et al. (2008) que analisaram o coeficiente de reflexão da caatinga preservada, e observaram valores médios oscilando entre 13 e 14%, porém, inferiores aos reportados por Souza et al. (2015b) e Silva, Lopez e Azevedo (2005) em trabalhos realizados no mesmo tipo de vegetação, encontraram valores médios iguais a 17% e 25%, respectivamente.

A disponibilidade de água compreende o principal fator que controla a distribuição da vegetação sobre a superfície terrestre e a resposta das espécies no que concerne à formação e manutenção da biomassa foliar (SANTOS et al., 2012). Assim, essa variação observada para o albedo está associada as condições da superfície no que se refere as mudanças da vegetação e da umidade do solo em decorrência da precipitação pluvial. Tal fato evidencia que, nos períodos das maiores médias diárias do albedo ( $\alpha$ ) foram observados os maiores valores do índice de cobertura vegetal (ICV) (Tabela 2), certamente esses dois parâmetros avaliados possuem alta relação.

**Tabela 2.** Valores médios de albedo ( $\alpha$ ), índice de cobertura vegetal (ICV), fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada ( $fPAR_i$ ) e absorvida ( $fPAR_a$ ) em área de caatinga em regeneração, Araripina-PE, durante o ano 2013.

Mês	$\alpha$ (%)	ICV ( $m^2 m^{-2}$ )	$fPAR_i$ (%)	$fPAR_a$ (%)
Janeiro	12,95 $\pm$ 0,63	0,56 $\pm$ 0,13	74,05 $\pm$ 0,02	67,21 $\pm$ 0,02
Fevereiro	14,48 $\pm$ 0,42	0,89 $\pm$ 0,26	80,72 $\pm$ 0,02	75,21 $\pm$ 0,03
Março	15,26 $\pm$ 0,32	1,15 $\pm$ 0,21	85,59 $\pm$ 0,03	80,12 $\pm$ 0,03
Abril	15,86 $\pm$ 0,49	1,95 $\pm$ 0,22	91,97 $\pm$ 0,01	86,96 $\pm$ 0,01
Mai	16,02 $\pm$ 0,41	2,28 $\pm$ 0,02	93,68 $\pm$ 0,004	88,61 $\pm$ 0,004
Junho	-	-	-	-
Julho	13,88 $\pm$ 0,59	1,73 $\pm$ 0,06	90,09 $\pm$ 0,008	83,61 $\pm$ 0,006
Agosto	-	-	-	-
Setembro	14,83 $\pm$ 0,24	1,02 $\pm$ 0,05	82,42 $\pm$ 0,007	74,62 $\pm$ 0,008
Outubro	14,45 $\pm$ 0,78	0,87 $\pm$ 0,10	79,86 $\pm$ 0,016	72,05 $\pm$ 0,015
Novembr o	14,78 $\pm$ 0,52	0,71 $\pm$ 0,06	77,90 $\pm$ 0,016	69,78 $\pm$ 0,015
Dezembro	13,28 $\pm$ 1,80	0,78 $\pm$ 0,34	78,82 $\pm$ 0,019	71,54 $\pm$ 0,02

\*Médias seguidas do desvio padrão (DP).

Outra variável de importante interesse quando se estuda sazonalmente o comportamento de ecossistemas, é a radiação fotossinteticamente ativa incidente ( $PAR_i$ ) a qual variou de 3,7 a 12,61 MJ  $m^{-2}$  durante o período estudado. Os maiores valores médios da  $PAR_i$  ocorreram nos meses de setembro (10,94  $\pm$  1,29 MJ  $m^{-2}$ ) e outubro (9,81  $\pm$  1,30 MJ  $m^{-2}$ ), enquanto os valores mínimos foram verificados nos meses de abril (7,33  $\pm$  2,57 MJ  $m^{-2}$ ) e maio (7,35  $\pm$  2,15 MJ  $m^{-2}$ ) (Tabela 2).

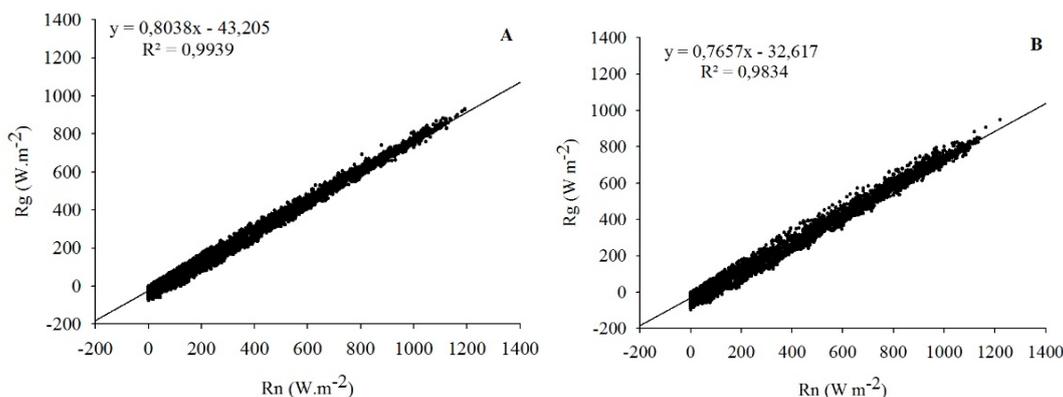
Os valores de  $PAR_i$  oscilaram ao longo do ano de acordo com a incidência de  $R_g$ , verificando assim, alta correlação linear significativa ao nível de 1% de probabilidade, entre a  $PAR_i$  e a  $R_g$  para o ano de 2013, sendo representado pela expressão matemática:  $PAR_i = 0,4157 R_g + 0,3559$ , com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,99. Verificou-se também que a radiação fotossinteticamente ativa incidente representou cerca de 41% do total da radiação solar global, cuja fração oscilou entre 41 e 46%, principalmente em decorrência da transmissividade atmosférica. Estes valores estão dentro da faixa observada em trabalhos para diferentes regiões, os quais citam valores para esta fração entre 40-50% (BAT-OYUN; SHINODA; TSUBO, 2012; SOUZA et al., 2015b).

Quando se analisou o valor médio anual da fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada ( $fPAR_i$ ) foram observados valores iguais a 83,51% sendo um pouco superior ao da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida ( $fPAR_a$ ) que foi igual a 76,97%, resultando apenas em 6,54% da radiação interceptada não foi absorvida pela cultura. Souza et al. (2015b) analisando a  $fPAR_i$  e  $fPAR_a$  em caatinga preservada encontraram valores médios iguais a 64% e 61%.

Os valores mais elevados das frações no presente trabalho, estão associados ao maior desenvolvimento foliar das espécies na área de estudo, representado pelo índice de cobertura vegetal (ICV) que atingiram valores médios máximos mensais no mês de maio (2,28  $\pm$  0,02  $m^2 m^{-2}$ ) (Tabela 2), durante o período chuvoso, onde a disponibilidade de água e luz promove o processo de fotossíntese e a formação de biomassa. Após esse mês, observou-se uma redução da cobertura do solo, atingindo os menores valores de ICV no mês de novembro (0,71  $\pm$  0,06  $m^2 m^{-2}$ ) (Tabela 2). Nessas condições, o baixo índice de precipitação associado às condições estressantes da atmosfera resultou na abscisão foliar, conseqüentemente, na diminuição da cobertura vegetal.

Os maiores valores médios mensais de  $R_n$  foram observados no segundo semestre, em razão da maior radiação solar e menor nebulosidade neste período. É interessante notar que mesmo com o aumento da radiação refletida ( $R_r$ ) (Tabela 1) e do BOL no período seco, o  $R_n$  ainda se manteve maior 6% quando comparado ao primeiro semestre. Com isso, a radiação solar incidente à superfície é o que mais influencia nos valores do  $R_n$ , sendo verificada uma relação linear significativa no primeiro e segundo semestre (Figura 2).

Em relação aos componentes do balanço de energia, os valores médios mensais podem ser observados na Tabela 3. Quando se analisou a partição do  $R_n$  em H, LE e G, pode-se constatar que a maior parte da energia foi utilizada na forma de calor sensível (H). No primeiro semestre, no entanto, os valores de LE foram dominantes na partição, representando 52,2% em relação a H (H/ $R_n$  = 28,2%). No segundo semestre este comportamento se inverteu e



**Figura 2.** Relação da radiação solar global ( $R_g$ ) e do saldo de radiação para o primeiro (A) e segundo (B) semestres de 2013 em área de caatinga em regeneração, em Araripina, PE.

**Tabela 3.** Densidade de fluxos dos componentes do balanço de energia e as relações médias destes com o  $R_n$ , em área de caatinga em regeneração, em Araripina, PE, durante o ano 2013.

Mês	Rn	LE H G			LE/Rn H/Rn G/Rn		
		(MJ m <sup>-2</sup> )			(%)		
Janeiro	11,34 ± 4,0	4,26 ± 0,4	5,10 ± 2,2	-0,02 ± 0,4	37,53	44,95	0,20
Fevereiro	14,85 ± 3,0	7,98 ± 0,4	4,39 ± 1,5	-0,03 ± 0,4	53,75	29,58	0,23
Março	12,57 ± 3,0	6,54 ± 0,2	3,24 ± 1,9	0,14 ± 0,2	52,08	25,78	1,09
Abril	11,47 ± 2,6	6,83 ± 0,2	2,21 ± 1,4	0,21 ± 0,2	59,55	19,23	1,79
Mai	11,30 ± 2,6	6,56 ± 0,2	2,42 ± 1,4	0,18 ± 0,2	58,04	21,41	1,56
Junho	-	-	-	-	-	-	-
Julho	12,48 ± 1,4	3,19 ± 0,2	7,16 ± 0,9	-0,05 ± 0,2	25,59	57,39	0,40
Agosto	-	-	-	-	-	-	-
Setembro	14,69 ± 0,8	1,58 ± 0,1	10,71 ± 0,2	-0,32 ± 0,1	10,76	72,90	2,16
Outubro	13,80 ± 1,9	1,47 ± 0,4	10,34 ± 0,9	-0,23 ± 0,4	10,68	74,96	1,64
Novembro	12,65 ± 2,7	1,56 ± 0,6	8,95 ± 0,9	-0,09 ± 0,6	12,31	70,76	0,68
Dezembro	11,85 ± 2,7	2,70 ± 0,4	6,34 ± 1,6	-0,09 ± 0,4	22,75	53,51	0,79

\*Médias seguidas do desvio padrão (DP).

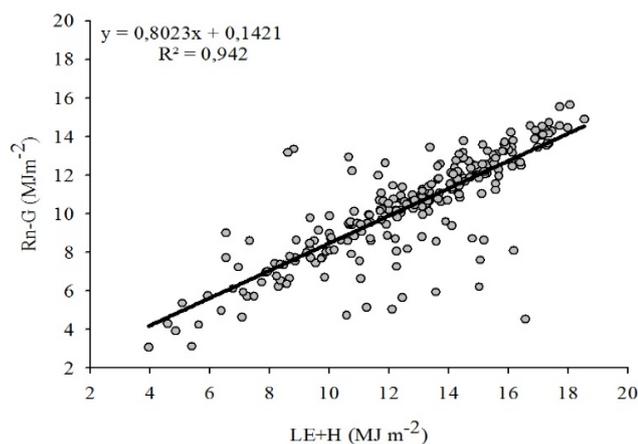
a energia destinada aos processos de aquecimento, representada pelo fluxo de calor sensível (H) consumiu a maior parte da energia disponível ( $H/R_n = 65,9\%$ ), enquanto  $LE/R_n$  foi equivalente a 16,4% (Tabela 3). Todavia, em termos médios anuais o H foi dominante representando 47,1% da energia disponível, com menor média (19,23%) no mês de abril, período em que se verificou maior disponibilidade de água devido às chuvas que ocorreram nos meses anteriores, aumentando gradativamente em períodos de estiagem, chegando a 74,96 % no mês de outubro.

A superioridade dos valores de LE no primeiro semestre ocorreu devido a maior disponibilidade de água neste período, quando foram observados eventos de chuva (Figura 1). De acordo com Oliveira et al. (2006), em regiões sob condições limitadas de água (semiáridas), a maior parte da energia disponível é liberada em forma de H. Este compor-

tamento tem sido evidenciado em diferentes estudos com caatinga preservada (TEIXEIRA et al., 2008; SOUZA et al., 2015a).

Constatou-se que o valor médio da razão entre  $(LE+H)$  e  $(R_n-G)$  representou cerca de 80% do saldo de radiação ( $R^2 = 0,94$ ) (Figura 3). Resultados semelhantes têm sido observados em regiões semiáridas (VEENENDAAL; KOLLE; LLOYD, 2004; OLIVEIRA et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2008). Nestas regiões, o não fechamento do balanço de energia pode estar associado à intensa incidência de radiação, que promove o aumento da temperatura nas camadas superficiais do solo, resultando no armazenamento de calor na camada acima do sensor (VEENENDAAL; KOLLE; LLOYD, 2004).

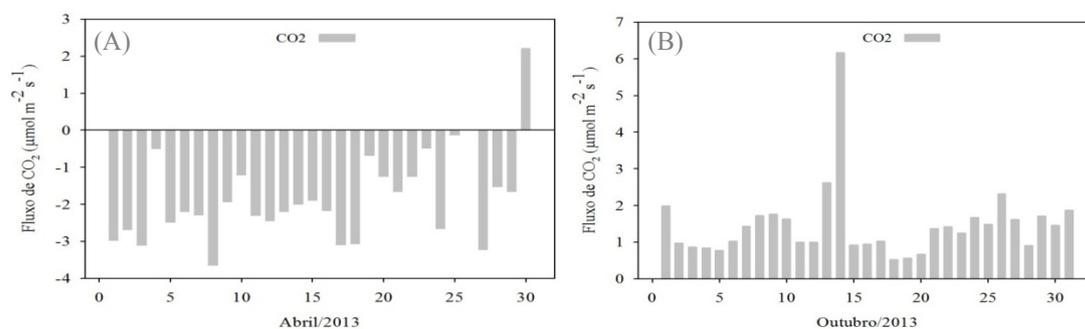
Diante das condições ambientais registradas no ano de 2013 em área de caatinga degradada, na Tabela 4 são apresentados os valores médios da variabilidade do fluxo



**Figura 3.** Relação entre a energia disponível no sistema ( $R_n - G$ ) e a soma dos fluxos de calor sensível e latente ( $LE + H$ ) em área de caatinga degradada em Araripina, PE, para o ano de 2013.

**Tabela 4.** Fluxo de gás carbônico ( $CO_2$ ) médio diário em área de Caatinga degradada em Araripina, PE, para o ano de 2013.

Mês	$CO_2$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ )
Janeiro	$1,04 \pm 1,32$
Fevereiro	$-1,29 \pm 1,01$
Março	$-1,26 \pm 0,93$
Abril	$-1,63 \pm 1,80$
Maio	$-1,55 \pm 1,21$
Junho	-
Julho	$1,52 \pm 3,44$
Agosto	-
Setembro	$2,10 \pm 0,67$
Outubro	$1,47 \pm 1,01$
Novembro	$1,58 \pm 0,78$
Dezembro	$1,86 \pm 1,27$



**Figura 4.** Variabilidade média diária do fluxo de dióxido de carbono ( $CO_2$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ ) durante os meses de abril e outubro em área de caatinga em regeneração, Araripina, PE, 2013.

de dióxido de carbono ( $CO_2$ ). No mês de janeiro a vegetação apresentou fluxos diários positivos médios da ordem de  $1,04 \pm 1,32 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , indicando emissão de  $CO_2$  para atmosfera. Esse comportamento pode estar relacionado à baixa disponibilidade hídrica resultante de baixo volume pluviométrico nos meses anteriores, já que a média do ICV no mesmo mês foi baixa, chegando a  $0,56 \pm 0,13 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  (Tabela 2).

No entanto, entre os meses de fevereiro e maio, o fluxo de carbono da vegetação chegou a valores médios na ordem de  $-1,43 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , indicando que nesse período o ecossistema atuou como sumidouro de  $CO_2$ . Para esses meses pode-se constatar um incremento nos valores de ICV, que atingiram médias iguais a  $1,57 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  (Tabela 2), associado a isto, constatou-se uma redução na temperatura do ar ( $T_{ar} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) que pode ter ocasionado redução nas atividades microbianas e, conseqüentemente, na liberação de  $CO_2$  do solo (SANTOS et al., 2012).

No segundo semestre, caracteristicamente seco, foram observados valores positivos nos fluxos de  $CO_2$ , com média de  $1,71 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ , quando a vegetação atuou como fonte de  $CO_2$  para a atmosfera, período em que se observaram

menores volumes de chuva (Figura 1) e menor ICV ( $1,02 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ) (Tabela 2). As mudanças que ocorrem no dossel dessa Caatinga degradada são extremamente dependentes dos níveis de umidade do solo favorecidos pela ocorrência de precipitação (SANTOS et al., 2012).

Para melhor compreensão das variações dos fluxos diários de  $CO_2$  durante o período chuvoso e seco, foram selecionados os meses de abril e outubro (Figura 4). Os resultados obtidos para abril (Figura 4A) mostram comportamento inverso ao mês de outubro (Figura 4B) onde a variação média do fluxo de  $CO_2$  foi de  $-1,88 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ , indicando que a taxa de absorção da caatinga em regeneração é superada pela emissão, atuando como sumidouro de carbono no período chuvoso, com maior ICV e menores temperaturas do ar ( $22,53 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e do solo ( $25,10 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

No mês de outubro considerado o mais seco, se observou déficit hídrico bastante elevado, com valores mínimos, médios e máximos de  $CO_2$  variando de  $0,52$ ,  $1,46$  e  $6,17 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ , respectivamente (Figura 4B), sendo que todos os valores foram positivos, o que indica que a fotossíntese foi minimizada nesse período devido à queda das folhas para reduzir a perda de água por transpiração, consequen-

temente causado a diminuição da atividade metabólica do ecossistema.

Além disso, o baixo ICV ( $0,87 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ), ocasionou áreas mais extensas de solo exposto, ocorrendo maiores perdas de  $\text{CO}_2$  do solo para atmosfera, observando valores médios mais elevados da temperatura do ar ( $24,46 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e do solo ( $31,62 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Segundo Santos et al. (2012) vários fatores incluindo temperatura, umidade, profundidade do solo, aeração e populações microbianas, determinam a taxa de fluxo de  $\text{CO}_2$  para atmosfera.

### Conclusões

O ano de 2013 na região do Araripe pernambucano apresentou precipitação inferior à média histórica, influenciando no desenvolvimento da vegetação, e por sua vez, em suas relações com a atmosfera. Nessa região, 41% da radiação solar incidente corresponde à radiação fotosinteticamente ativa (PAR); com coeficiente de reflexão para ondas curtas (albedo) variando de 11 a 16,5%, relacionado com os índices pluviométricos e com o índice de cobertura vegetal.

A maior parte da energia disponível foi utilizada no aquecimento do ar, na forma de fluxo de calor sensível (H), enquanto o fluxo de calor no solo (G) representou apenas 1% do saldo de radiação.

As trocas de radiação e energia no sistema solo-planta-atmosfera, contribuíram para que a assimilação de carbono na caatinga em regeneração seja altamente dependente da ocorrência de chuvas, e responsiva a temperatura do ar e do solo, portando-se, como sumidouro de  $\text{CO}_2$  atmosférico durante o primeiro semestre do ano e fonte no segundo.

### Agradecimentos

À FACEPE pela concessão da Bolsa de Mestrado ao primeiro autor; ao IPA pela disponibilização da área, à FINEP por meio do Projeto MUCLIFE, à FACEPE pelo apoio junto ao Projeto Caatinga-FLUX Fase 2 e à Embrapa pela infraestrutura de apoio.

### Referências

- BAT-OYUN, T.; SHINODA, M.; Tsubo, M. Effects of cloud, atmospheric water vapor, and dust on photosynthetically active radiation and total solar radiation in a Mongolian grassland. *Journal of Arid Land*, Russia, v. 4, n. 4, p. 349-356, 2012.
- CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; OLIVEIRA, G. S. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região Semiárida do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 139-152, 2013.
- DECAGON DEVICES INC. *AccuPAR. Linear PAR/LAI ceptometer Model PAR-80*. Operator's Manual Version 3.4. Pullman, WA. 2001. 149 p.
- GOWER, S. T.; KUCHARIK, C. J.; NORMAN, J. C. Direct and indirect estimation of leaf area index, f PAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 70, n. 1, p. 29-51, 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Censo Demográfico* 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.
- MOURA, M. S. B. et al. *Clima e água de chuva no Semi-Árido*. In: BRITO, L. T. L.; MOURA, M. S. B.; GAMA, G. F. B. (Orgs.). *Potencialidades da Água de Chuva no Semi-Árido Brasileiro*. 1. ed. Embrapa Semi-Árido, Petrolina, p. 37-59, 2007.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Caatinga*. Disponível em: [-http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga-](http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga). Acesso em: 20 de fevereiro de 2016.
- OLIVEIRA, M. B. L. et al. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de Caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 378-386, 2006.
- PAZ, J. E. (Coord.). *Dados pluviométricos mensais do Nordeste - Estado de Pernambuco*. Recife, 1990. 363 p. (SUDENE. Pluviometria, 6)
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C.; *Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações práticas*. Porto Alegre Guaíba Agropecuária, 2002. 478 p.
- REZENDE, L. F. et al. Calibration of the maximum carboxylation velocity ( $V_{cmax}$ ) for the Caatinga for use in dynamic global vegetation models (DGVMs). In: AGU Fall Meeting, 2013, San Francisco. AGU, 2013.
- SÁ, I. I. S. et al. Avaliação da degradação ambiental na região do Araripe pernambucano utilizando técnicas de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 4, n. 6, p. 1292-1314, 2011.
- SANTOS, S. A. et al. Aspectos da variabilidade sazonal da radiação, fluxos de energia e  $\text{CO}_2$  em área de Caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 04, p. 761-773, 2012.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com bas em imagens LANDSAT 5-TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Sete Lagoas, v. 13, n. 2, p. 11-21, 2005.
- SOUZA, L. S. B. et al. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 50, n. 8, p. 627-636, 2015a.
- SOUZA, L. S. B. et al. Balanço de Radiação em Ecossistema de Caatinga Preservada Durante um Ano de Seca no Semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 8, n. 1, p. 41-55, 2015b.
- TEIXEIRA, A. H. C. et al. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 362, n. 1, p. 110-127, 2008.
- VEENENDAAL, E. M.; KOLLE, O.; LLOYD, J. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane woodland) in Southern Africa. *Global change Biology*, Oxford, v. 10, n. 3, p. 318-328, 2004.

### REFERENCIAÇÃO

PIRES, W.N.; MOURA, M.S.B.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; CARVALHO, H. F. S. Fluxos de radiação, energia,  $\text{CO}_2$  e vapor d'água em uma área de caatinga em regeneração. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.25, n.1, p.143-151, 2017.

**Declaração:** os trabalhos estão sendo publicados nesse número de AGROMETEOROS (v.25, n.1, ago 2017) conforme foram aceitos pelo XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, realizado de 14 a 18 de agosto de 2017, em Juazeiro, BA e Petrolina, PE, sem revisão editorial adicional da revista.

# Radiation, energy, CO<sub>2</sub> and water vapor fluxes on a degraded caatinga area

Wilis Neiva Pires<sup>1</sup>, Magna Soelma Beserra de Moura<sup>2(\*)</sup>, Luciana Sandra Bastos de Souza<sup>3</sup>, Thieres George Freire da Silva<sup>3</sup>, Herica Fernanda de Sousa Carvalho<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mestre, Engenharia Agrícola, UNIVASF, Juazeiro, BA, w.pires12@hotmail.com

<sup>2</sup>Pesquisadora, Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, magna.moura@embrapa.br

<sup>3</sup>Professor (a), UAST/UFRPE, Serra Talhada, PE, sanddrabastos@hotmail.com, thieres\_freire@yahoo.com.br

<sup>4</sup>Bolsista DTI, CNPq, Embrapa Semiárido, Petrolina-PE

(\*)Corresponding author

---

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 16 June 2017

Accepted 10 August 2017

### Index terms:

eddy covariance

precipitation

vegetation cover index

## ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the fluxes of radiation, energy, carbon dioxide and water vapor in an area of regenerating caatinga in the Chapada do Araripe, Pernambuco. For this purpose, micrometeorological data were obtained during the year 2013, based on measurements made by electronic sensors installed in a micrometeorological tower of 8 meters high, located in an area with degraded caatinga vegetation, at the Instituto Agrônômico de Pernambuco - IPA, municipality of Araripina, PE. The results showed that the year of 2013 in the Araripe region of Pernambuco showed lower rainfall than the historical average, influencing vegetation development and, in turn, its relationship with the atmosphere. 41% of incident solar radiation corresponds to photosynthetically active radiation (PAR); The reflection coefficient for short waves (albedo) ranged from 11 to 16.5% and the leaf area index was between 0.3 and 2.1 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, 45% of the radiation balance was used for heating in the form of sensible heat flow (H), with energy balance closing 80%. The soil heat flux (G) represented only 1% of the radiation balance. All this information contributed to the fact that carbon assimilation in the degraded caatinga is highly dependent on the occurrence of rainfall, being a sink of atmospheric CO<sub>2</sub> during the first half of the year and as a source in the second.

© 2017 SBAGro. All rights reserved.

---

## CITATION

PIRES, W.N.; MOURA, M.S.B.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; CARVALHO, H. F. S. Fluxos de radiação, energia, CO<sub>2</sub> e vapor d'água em uma área de caatinga em regeneração. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.25, n.1, p.143-151, 2017.

**Disclaimer:** papers are published in this issue of AGROMETEOROS (v. 25, n.1, aug 2017) as accepted by the XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, held August 14-18, 2017 in Juazeiro, Bahia and Petrolina, Pernambuco, Brazil, without further revision by editorial board.