



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Balanco de radiação em ecossistema de Caatinga preservada durante um ano de seca no semiárido Pernambucano

Luciana Sandra Bastos de Souza¹, Magna Soelma Beserra de Moura², Gilberto Chohaku Sedyama³, Thieres George Freire da Silva⁴

¹ Dr. em Meteorologia Agrícola, Professora Assistente I, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3216. sandrabastos@yahoo.com.br (autor correspondente). ² Dr. Pesquisadora, Embrapa Semiárido, BR 428, Km 152, Zona Rural - Caixa Postal 23, CEP 56302-970, Petrolina, Pernambuco. (87) 3866-3600. magna_upa@hotmail.com. ³ Professor Titular, Departamento de Engenharia Agrícola, Unidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Holfs, s/n, CEP 36570-000, Viçosa, Minas Gerais. (31) 3899-1880. g.sedyama@ufv.br. ⁴ Professor Dr. Adjunto III, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3208. thieres_freire@yahoo.com.br.

Artigo recebido em 09/11/2014 e aceito em 24/02/2015

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar as variações diárias e sazonais dos componentes do balanço de radiação e da radiação fotossinteticamente ativa para a Caatinga durante um ano seco no Semiárido pernambucano. O experimento foi conduzido durante o ano de 2012 em Petrolina, PE, localizado na região do Semiárido brasileiro. Para determinação dos componentes do balanço de radiação foi utilizado um saldo radiômetro modelo CNR1 instalado à 13,3 metros da superfície. Adicionalmente, analisou-se a interação entre a vegetação e a radiação por meio de sensores para o monitoramento da radiação fotossinteticamente ativa acima e em diferentes posições abaixo do dossel da caatinga. Estes dados foram utilizados no cálculo da fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (fRFA_i) e absorvida (fRFA_a). Foi observada uma ampla variação sazonal da radiação solar global e do saldo de radiação que atingiram valores médios diários em torno de 23 MJ m⁻² dia⁻¹ e 15 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente. Neste caso, observou-se que a magnitude dos valores dos componentes do balanço de radiação foi afetada principalmente em decorrência da nebulosidade e mudanças na vegetação que afetaram principalmente os níveis de emitância e reflexão da superfície. No que se refere às frações da radiação fotossinteticamente ativa interceptada e absorvida, observou-se que as mesmas apresentaram valores médios diários ao longo do ano próximos, os quais foram iguais a 0,69 e 0,64, nesta ordem. Estes dados podem ser extremamente úteis para uma melhor compreensão da interação entre a caatinga e a atmosfera sob condições climáticas singulares.

Palavras-chave: radiação, saldo de radiação, radiação fotossinteticamente ativa, caatinga, seca.

Radiation balance in Caatinga ecosystem preserved for a year drought in semiarid Pernambuco

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the daily and seasonal variations of the components of the radiation balance and photosynthetically active radiation for the Caatinga during a dry year in Pernambuco Semi-Arid. The experiment was conducted during the year 2012 in Petrolina, PE, located in the Brazilian semiarid region. To determine the components of the radiation balance we used a balance radiometer CNR1 model installed the 13.3 meters of surface. Additionally, we analyzed the interaction between vegetation and radiation using sensors to monitor the photosynthetically active radiation above and in different positions under the canopy of scrub. These data were used to calculate the fraction of intercepted photosynthetically active radiation (fRFA_i) and absorbed (fRFA_a). A wide seasonal variation of solar radiation and net radiation was observed that reached daily averages around 23 MJ m⁻² d⁻¹ and 15 MJ m⁻² d⁻¹, respectively. In this case, it was observed that the magnitude of the component values of the radiation balance was mainly affected due to the cloudiness and changes in vegetation which mainly affected the levels of emittance and reflection surface. With regard to fractions of intercepted and absorbed photosynthetic active radiation, it was observed that they had daily average values over the next years, which were equal to 0.69 and 0.64 in order. This data can be extremely useful for a better understanding of the interaction between the savanna and the atmosphere under natural climatic conditions.

Keywords: radiation, net radiation, photosynthetically active radiation, Caatinga, dry.

* E-mail para correspondência:

sandrabastos@yahoo.com.br (Souza, L. S. B. de).

Introdução

Os ecossistemas Áridos e Semiáridos recobrem aproximadamente 40% da superfície continental do Planeta, representando, desta forma, um importante componente do sistema climático terrestre (Novick et al., 2004; Rotenberg e Yakir, 2010; Krishnan et al., 2012). No Brasil, este tipo de bioma está representado pela Caatinga e encontra-se presente na região Nordeste. O mesmo se estende por uma área de aproximadamente 844.000 km² e caracteriza-se por apresentar uma vegetação predominantemente xerófila e decídua. Embora possua grande abrangência (9,92% do território nacional), a Caatinga é uma das composições florísticas brasileira menos estudada e menos protegida, de modo que aproximadamente 42% da vegetação que a compõe já foram intensamente modificadas (Casteleti et al., 2004).

O clima da região é BSw^h, ou seja, semiárido, onde são observadas temperaturas do ar elevadas com valores médios anuais variando entre 23 °C e 27 °C. A precipitação pluvial apresenta ampla variabilidade espaço-temporal, com valores médios anuais baixos, que oscilam entre 400 e 800 mm, distribuídos em apenas quatro meses chuvas por ano; por outro lado, o Semiárido brasileiro apresenta longo período de estiagem, que associado aos baixos volumes pluviométricos e a elevada demanda atmosférica, constitui-se em um dos principais fatores associados à ocorrência das secas (Moura et al., 2007). Esta variabilidade tem sido vinculada às variações do padrão de temperatura da superfície do mar (TSM) nos oceanos tropicais, os quais tem influencia direta sobre a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ao sul do Equador e consequentemente, na qualidade do período chuvoso da região Nordeste (Nobre e Melo, 2001; Moura et al., 2007). A combinação dos elementos meteorológicos nesta região culminam em elevada demanda atmosférica, com evaporação atingindo em média 2.000 mm ano⁻¹ (IICA, 2002 CITADO POR Moura et al., 2007).

Nos meses secos a demanda atmosférica torna-se substancialmente elevada, promovendo estresse hídrico nas espécies vegetais, que pode ser potencialmente agravado em decorrência de mudanças nos padrões atmosféricos de larga escala, como fenômenos da interação oceano-atmosfera que interferem diretamente no clima, intensificando ou anulando a quadra chuvosa como é o caso do El Niño e do Dipolo do Atlântico. Um exemplo foi o no ano de 2012 quando a ocorrência do fenômeno Dipolo do Atlântico culminou em alterações no regime pluviométrico da região, e consequentemente na intensidade da seca (CPTEC, 2012; Gutiérrez et al., 2014).

Os elementos do clima: a radiação solar, a temperatura e a precipitação (disponibilidade de água) são os principais condicionantes no desenvolvimento

das espécies em ecossistemas naturais. Uma das formas de se caracterizar a interação biosfera - atmosfera pode ser por meio do estudo do balanço radiativo à superfície, em geral, utilizando-se métodos micrometeorológicos ou pelo uso da técnica de sensoriamento remoto (Giambelluca et al., 2009; Souza et al., 2010; Zhang et al., 2010). Ademais, o conhecimento da interação da vegetação com a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) pode ser extremamente útil no entendimento das variações do balanço de carbono à superfície em escalas inter e intranuais, para a caracterização do crescimento de espécies, cálculo do índice de área foliar, produtividade de um ecossistema, dentre outros (Fontana et al., 2012; Wang et al., 2010; Wang et al., 2014). A RFAa, pode ser obtida por meio do balanço entre a radiação fotossinteticamente ativa incidente e refletida a que atinge o solo e por ele é refletida. Estudos têm demonstrado a obtenção deste parâmetro tem sido realizada por meio de modelagem utilizando a técnica de sensoriamento remoto (Fontana et al., 2012).

Para a Caatinga, estudos desta natureza são bastante escassos, podendo-se citar os trabalhos desenvolvidos por Teixeira et al. (2008) e Oliveira et al. (2006), em ambos os casos, os resultados expressam o comportamento do bioma em condições de precipitação normal e acima da média da região, sendo inexistentes pesquisas direcionadas para condições climáticas peculiares, como foi o caso do ano de 2012, em que principalmente devido ao fenômeno Dipolo do Atlântico, pode-se constatar uma seca muito intensa.

Informações deste tipo são de extrema relevância para a formulação de políticas ambientais e climáticas (Baldocchi et al., 1996), reforçando a importância de sua aplicação nesse bioma. Além disso, enfatiza-se sua relevância em estudos de modelagem, seja climática (Paiva, 2005), estimativa de biomassa (Abraha e Savage, 2008), sequestro de carbono (Kato et al., 2004; Yuan et al., 2010; Wang et al., 2010), dentre outras. Assim, objetivou-se por meio deste trabalho analisar as variações diárias e sazonais dos componentes do balanço de radiação e da radiação fotossinteticamente ativa para a Caatinga durante um ano considerado climaticamente seco na região do São Francisco Pernambucano.

Material e Métodos

Localização e Caracterização da Área Experimental

O experimento foi realizado em uma área com caatinga preservada localizada na Embrapa Semiárido (9°05'S; 40°19' W; 350 m), município de Petrolina, PE (Figura 1).

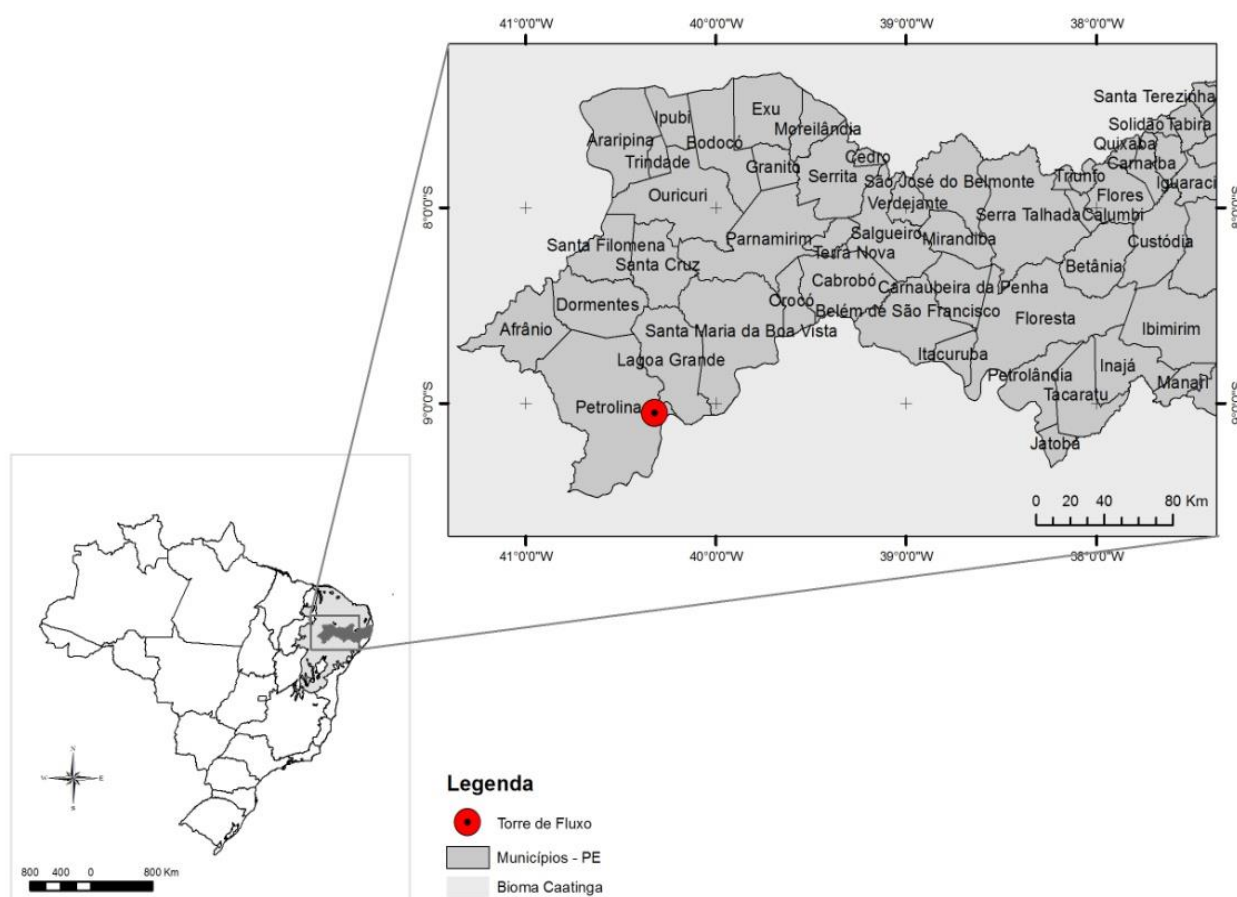


Figura 1. Localização geográfica da torre micrometeorológica para o monitoramento dos fluxos de energia, vapor d'água e massa em uma área de Caatinga preservada, Petrolina-PE.

O clima da região, segundo Köppen, é classificado como BSw^h, ou seja, semiárido, com estação chuvosa compreendida entre os meses de janeiro e abril, precipitação média anual de 510 mm e temperaturas médias anuais, elevadas, da ordem de 26,2 °C. A área em estudo apresenta um relevo plano e totaliza aproximadamente 600 ha, sendo composta por vegetação hiperxerófila de porte arbóreo-arbustivo, com altura média de aproximadamente cinco metros. Dentre as espécies vegetais da área de estudo se destaca a presença de: *Poincianella microphylla* (Mart. ex G. Don) L. P. Queiroz, *Croton conduplicatus* Kunth, *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud., *Manihot pseudoglaziovii* (Pax & Hoffman) e *Commiphora leptophloeos* (Mart.) Gillett.

Medições Micrometeorológicas

As medidas micrometeorológicas foram efetuadas durante o ano de 2012 por meio de sensores instalados em uma torre com 16 metros de altura, no centro da área experimental. Para a determinação dos componentes do balanço de radiação foi utilizado um saldo radiômetro (CNR-1, Net radiometer - Kipp & Zonen B.V., Delft, Netherlands) instalado 13,3 m acima da superfície do solo. As medidas da temperatura e umidade relativa do ar (HMP45C, Vaisala, Finlândia) e precipitação (CS700-L

Hydrological Services Rain Gauge, Liverpool, Austrália) foram realizadas à altura de 15,7 m e 16,3 m, respectivamente, enquanto a temperatura do solo foi obtida a 0,02 e 0,08 m (CS107, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) e a velocidade do vento (anemômetro sônico, WindMaster Pro, Gill, Lymington, Reino Unido) a 16,9 m de altura.

Também foi realizada a análise das interações entre a vegetação e a radiação fotossinteticamente ativa por meio do uso de quatro sensores *quantum*, dos quais dois (LI-190SA, Li-cor, Nebraska, USA) foram instalados acima do dossel, sendo um com a face sensível voltada para cima (para medição da radiação fotossinteticamente ativa incidente no topo da vegetação, RFA_T) outro com a face para baixo (para obtenção da RFA refletida, RFA_r), e os outros dois em duas diferentes posições abaixo do dossel (radiação fotossinteticamente ativa incidente na base, RFA_B, LI-191SA, Li-cor, Nebraska, USA). Todos os sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados (modelo CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) programado para realizar medidas a cada 30 segundos e armazenar médias em intervalos de 30 minutos.

Componentes do Balanço de Radiação

Como resultado do balanço de radiação tem-se a energia disponível no sistema para os processos de aquecimento do ar e do solo, evaporação e

transpiração, também conhecida por saldo de radiação (R_n), cujos valores podem ser obtidos pela expressão:

$$R_n = BOC + BOL \quad (1)$$

em que: BOC = balanço de ondas curtas e BOL = balanço de ondas longas na superfície.

O balanço de ondas curtas representa a contabilização entre a radiação solar incidente no sistema (radiação solar global) e a radiação de ondas curtas refletida pela superfície, que foi obtida pela expressão:

$$BOC = Q_g \times (1 - \alpha) \quad (2)$$

em que Q_g = radiação solar global ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) e α = albedo.

O α depende da capacidade da superfície de refletir energia, que varia em decorrência do tipo e cor da superfície, ângulo zenital e grau de cobertura do solo, dentre outros. Podendo ser denominada também de coeficiente de reflexão e calculado pela relação entre a radiação solar refletida e a incidente sobre a superfície, como segue:

$$\alpha = \frac{Q_r}{Q_g} \times 100 \quad (3)$$

em que: α é expresso em porcentagem (%) e Q_r é a radiação solar de ondas curtas refletida pela superfície ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$).

Já o balanço de ondas longas (BOL) foi determinado por meio da contabilização entre as entradas e saídas de radiação de ondas longas como segue:

$$BOL = Q_a - Q_s \quad (4)$$

em que: Q_a é a radiação de ondas longas emitida pela atmosfera ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) e Q_s é a radiação de ondas longas emitida pela superfície ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$).

Interação entre a Vegetação e a Radiação Fotossinteticamente Ativa

Para a caracterização da interação entre a vegetação e a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foram utilizados os seguintes parâmetros: fração da RFA interceptada e absorvida e nível de cobertura do solo (NCS). A estimativa da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida ($fRFA_a$) foi realizada com base na metodologia proposta por Gower et al. (1999), por meio da equação 5:

$$fRFA_a = \frac{(RFA_T - RFA_R) - (RFA_B - RFA_{RO})}{RFA_T} \quad (5)$$

em que: RFA_T é a radiação fotossinteticamente ativa incidente no topo do dossel, RFA_R é a radiação fotossinteticamente ativa refletida pelo dossel, RFA_B é a radiação fotossinteticamente ativa incidente abaixo do dossel e RFA_{RO} é a radiação fotossinteticamente ativa refletida abaixo do dossel.

Já a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada ($fRFA_i$) foi determinada por meio da seguinte equação:

$$fRFA_i = 1 - \frac{RFA_B}{RFA_T} \quad (6)$$

Adicionalmente, foi estabelecida a relação entre a radiação solar global (Q_g , $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) e a radiação solar incidente no topo da atmosfera (Q_o , $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), obtendo-se desta forma, o coeficiente de transmissividade atmosférica (K_t , adimensional), como segue:

$$K_t = \frac{Q_g}{Q_o} \quad (7)$$

Os componentes do balanço de radiação foram analisados por meio do seu comportamento ao longo dos dias e durante o ano de 2012. Para isso, foram selecionados quatro dias específicos: dois dias de céu claro, sendo um com nível de cobertura do solo em torno de 85% e outro com 50%; e dois dias nublados com as mesmas condições de cobertura do solo.

Resultados e Discussão

Variáveis Ambientais

O ano de 2012 foi marcado pela ocorrência um volume pluviométrico baixo, apresentando um total acumulado de 92,2 mm ano⁻¹, que foi muito inferior a normal climatológica da região (510 mm anuais) (EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2013). Essa seca intensa foi ocasionada pelo fenômeno Dipolo do Atlântico, com temperaturas muito positivas na Bacia do Atlântico Norte, que afetaram o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical mais ao norte e, conseqüentemente, a qualidade da estação chuvosa na Região Nordeste (CPTEC, 2012). Em decorrência disso, com exceção da precipitação, foram observados valores médios das variáveis meteorológicas acima da normal climatológica da região, destacados entre parênteses. Assim, observou-se radiação solar global média anual de 23,15 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ (20,15 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), temperatura do ar média, máxima e mínima iguais a 26,9 °C (26,2 °C), 33,8 °C (31,8 °C) e 21,5 °C (21,5 °C) e umidade relativa média bastante reduzida, com valor médio igual a 48,8% (58%) (Figura 2a). Neste caso, a temperatura e a umidade relativa do ar mantiveram um comportamento praticamente constante ao longo do ano. Todos estes elementos associados a velocidade do vento média anual relativamente alta (4,56 $m\ s^{-1}$) resultaram em demanda atmosférica elevada, com valores de déficit de pressão de vapor médios em torno de 2,5 kPa (Figura 2c).

O comportamento da radiação solar global teve influencia direta no comportamento da temperatura do solo, que atingiu valores médios diários elevados que oscilaram entre 34 e 38 °C, com mínimos próximos à 26 °C (Figura 2b).

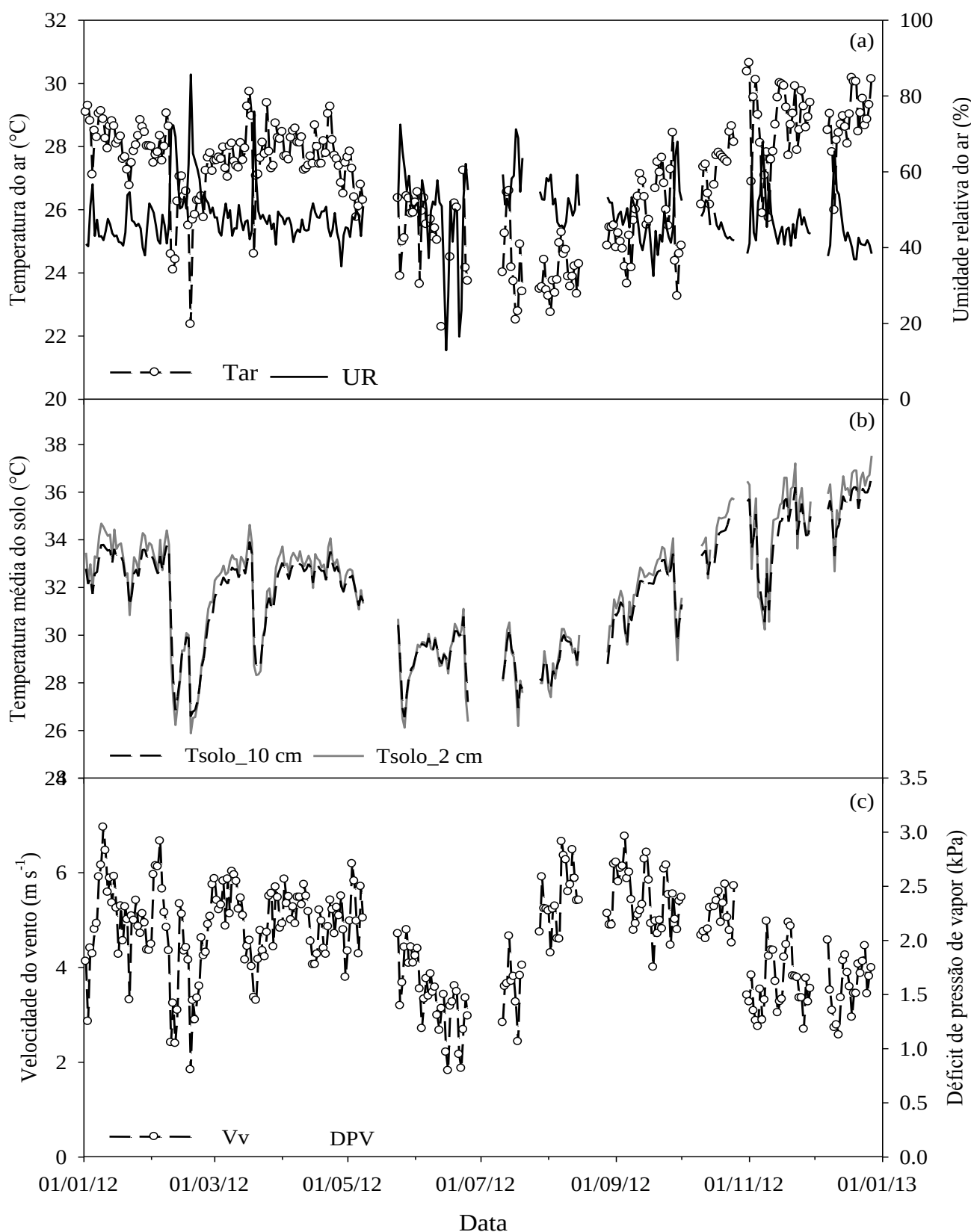


Figura 2. Comportamento dos elementos meteorológicos: temperatura e umidade do ar (a), velocidade e direção do vento (b), precipitação pluvial e conteúdo de água no solo (c) em uma área de Caatinga durante o período de janeiro de 2012 a maio de 2013 no Campo Experimental da Caatinga, Petrolina-PE.

Coeficiente de transmissividade atmosférica

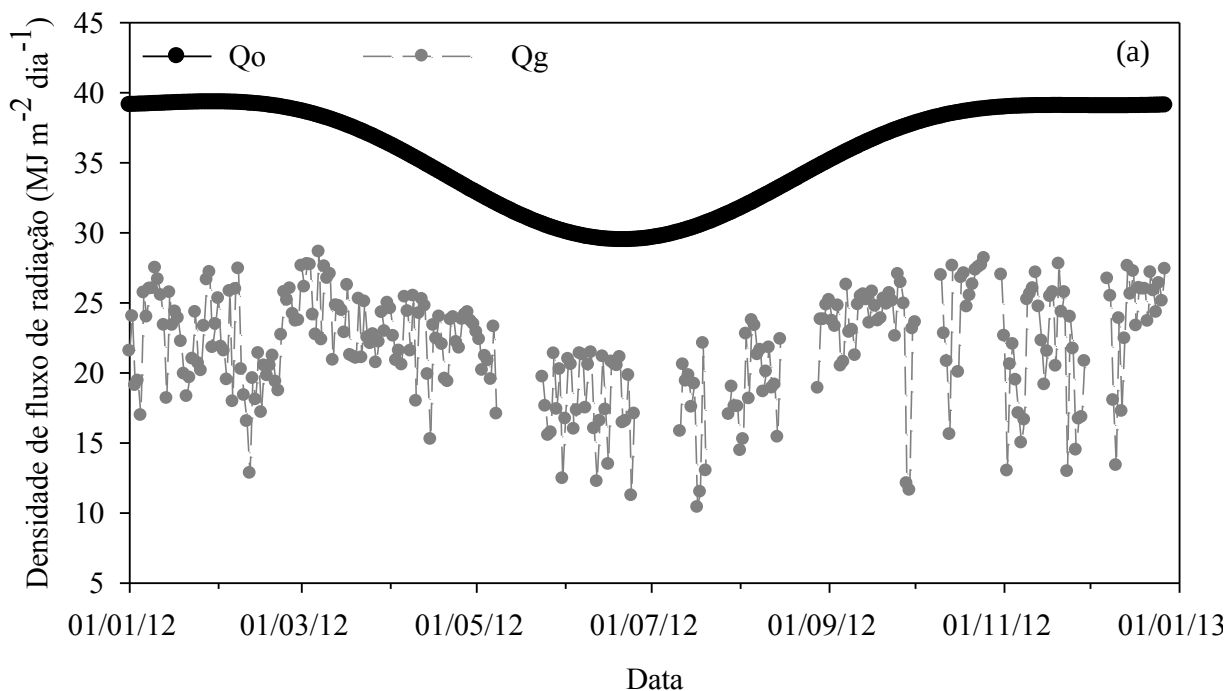
A determinação da radiação solar global incidente no topo da atmosfera e sua relação com a

radiação solar global incidente na superfície é de extrema importância uma vez que pode ser útil para entender a qualidade da atmosfera por meio de sua turbidez (Querino et al., 2011).

O comportamento diário da radiação solar extraterrestre (Q_o) e da radiação solar global (Q_g) durante o ano de 2012 sob a área de caatinga preservada é apresentado na Figura 3a. Observa-se que em Q_g apresentou-se seguiu aproximadamente o comportamento da Q_o , sendo influenciada pelas condições da atmosfera, como a presença de nuvens e ocorrência de precipitação (Figura 3b). Pode-se observar que para ambos os parâmetros o início do ano foi marcado pela ocorrência de valores elevados com máximos de Q_o e Q_g ocorridos no mês de janeiro/2012 iguais a $41 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $29 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente e mínimos de $29 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em junho/2012 (Figura 3a). Sendo estas

variações relacionadas as mudanças das estações do ano. A sazonalidade destes parâmetros tem evidenciada em estudos realizados em diferentes estudos (Querino et al., 2011; Souza e Escobedo, 2013). A Q_o ao entrar em contato com os constituintes atmosféricos foi atenuada em cerca de 26%, em dias de céu claro e, 70% em dias nublados, com valores médios anuais da transmitância iguais a 60% (Figura 3b). Neste caso, os menores valores da Q_g foram observados principalmente nos dias em que houveram precipitações e no período do inverno da região, principalmente em decorrência da nebulosidade.

Souza e Escobedo realizaram um estudo em superfícies planas e inclinadas na região de Botucatu e encontraram valores da transmissividade da radiação global mínimos de 14,35% – 27,86% e máximos entre 62,10% - 78,90%, em diferentes períodos analisados.



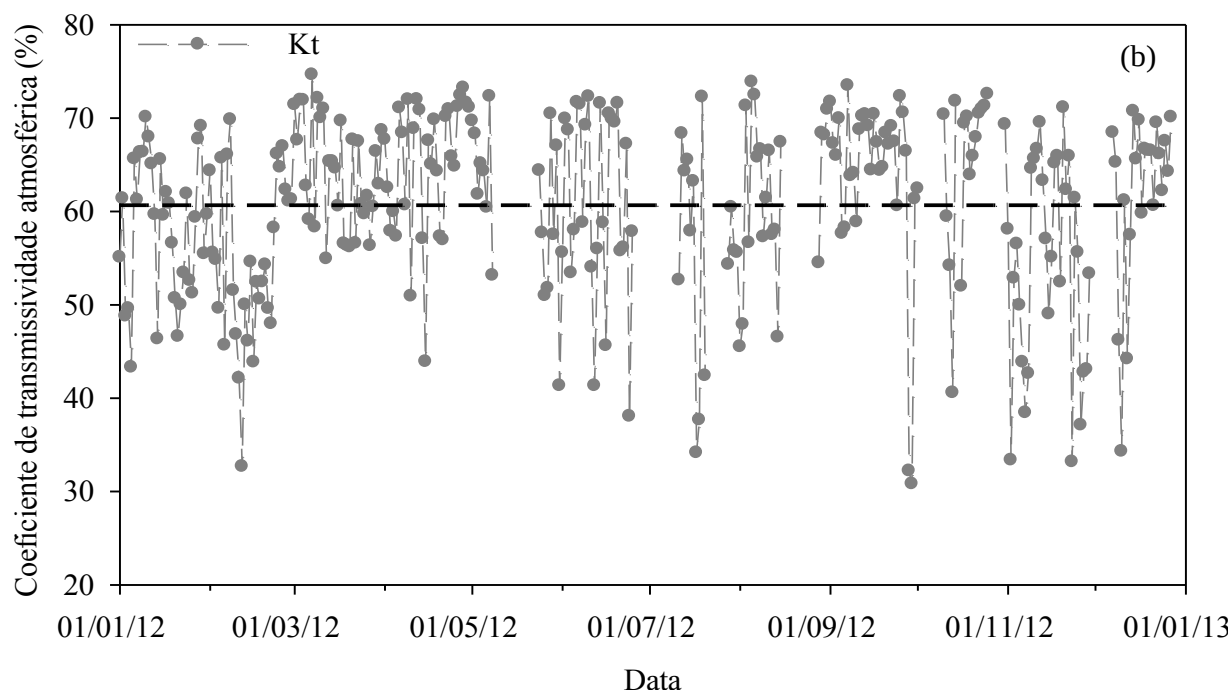


Figura 3. Comportamento da radiação solar extraterrestre e radiação solar (a) e coeficiente de transmissividade atmosférica (b) em uma área de Caatinga preservada, Petrolina-PE, 2012.

Interação Entre a Vegetação e a Radiação Fotossinteticamente Ativa

No Semiárido brasileiro, a precipitação pluvial é a principal fonte de água para realização dos processos fisiológicos da vegetação. Deste modo, a ocorrência dos baixos volumes pluviométricos associados às condições estressoras da atmosfera resultou na abscisão foliar antecipada, e consequentemente, uma diminuição do fator de cobertura do solo. Nesse caso, o ano iniciou com valores elevados de cobertura do solo, em torno de 75% (quando o índice de área foliar - IAF foi de $2,64 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), decorrente da folhagem remanescente formada em função das chuvas que totalizaram 20 mm em dezembro, e atingindo valores máximos de 85% (IAF = $3,45 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) logo após eventos de precipitação ocorridos em fevereiro de 2012, que totalizaram 43,94 mm.

O nível de cobertura do solo se manteve até o final do mês de março devido ao pequeno volume de precipitação ocorrido, que naquele ano esteve concentrado em quatro dias apenas (cerca de 70% do total precipitado). Posteriormente, observou-se tendência à redução da cobertura do solo atingindo valores próximos a 50% no mês de agosto.

A oscilação no comportamento da cobertura foliar da vegetação e a presença de galhos secos, representados pela cobertura do solo, resultou em variações na radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada e absorvida pela caatinga, como pode ser observado na Figura 4. A RFA incidente sobre a vegetação (RFA_T) apresentou variação intranual em decorrência da mudança das estações do ano, atingindo valores máximos diários entre os meses de janeiro e abril ($\sim 11,34 \pm 1,98 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), posteriormente com o início do inverno ocorreu certa redução atingindo valores médios diários em torno de $9,25 \pm 1,33 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

d^{-1} , sendo verificados dias com mínimo de $5,26 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 4a). Estes valores representaram o percentual que oscilou entre 40 e 50% da radiação solar global (RFA/Qg), com valores máximos ocorridos no início do ano e mínimos durante o segundo semestre do ano. Estes resultados são concordantes com os reportados na literatura que mencionam variações entre 40 – 50% para a razão RFA/Qg em diferentes regiões (Bat-Oyun et al., 2012; Pereira et al., 2002). Com algumas variações nos valores desta relação ao longo do ano, que são dependentes das condições da atmosfera local. Bat-Oyun analisando a relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e global observaram valores de 42% no mês de abril e 45,9% no mês de julho, com valores médios anual de 43,5%. Jacovides et al. (2003) estudando esta relação na bacia do Mediterrâneo Oriental constataram valores diários iguais a 45,6% durante o verão e 45,1% no inverno, com valores médios anuais de 45,4%. Assis e Mendez (1989) analisando RFA/Qg na região de Pelotas-RS, encontraram valores da relação iguais a 47%.

O comportamento da RFA incidente no interior da vegetação por outro lado, apresentou valores mais reduzidos no início do ano, com posterior tendência a aumento ocorrido devido à abscisão foliar, que possibilitou maior exposição do solo (Figura 4a) no segundo semestre. Enquanto no primeiro semestre a radiação fotossinteticamente ativa incidente no interior da vegetação apresentou valor médio de $2,45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, representando 23,4% do total incidente; no segundo período do ano, quando as plantas encontravam-se praticamente sem folhas, RFA_B foi de $3,84 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, equivalente a 39% do total incidente.

As frações da radiação fotossinteticamente ativa interceptada e absorvida apresentaram valores médios diários muito próximos, com máximos, médios e mínimos da ordem de 0,87; 0,64 e 0,46 e 0,82; 0,61 e

0,24 para a $fRFA_i$ e $fRFA_a$, respectivamente. Os maiores valores foram observados em dias de ocorrência de precipitação e em dias aproximadamente posteriores a estes eventos, o que provavelmente está associado à disponibilidade hídrica do sistema que possibilitaram a realização do processo fotossintético pela vegetação e consequentemente a maior utilização da radiação fotossinteticamente ativa. Em termos médios foi verificada uma relação linear direta relação entre os valores de $fRFA_i$ e $fRFA_a$ com um coeficiente angular médio anual de 0,94, com pequena variação

deste coeficiente para o primeiro e segundo semestres, com valores iguais a 0,93 e 0,95, respectivamente (Figura 4b). Portanto, em média apenas 6% da RFA interceptada não foi absorvida pela vegetação, representando desta forma, a porção refletida. Esse padrão depende da arquitetura do dossel, condição hídrica da planta e solo. Para culturas agrícolas Müller e Bergamaschi (2005) encontraram diferenças em torno de 7,6% para a $fRFA_i$ e $fRFA_a$ 7,6% na cultura do milho; já Randin et al. (2003) citam diferenças em torno de 10% para o tomateiro.

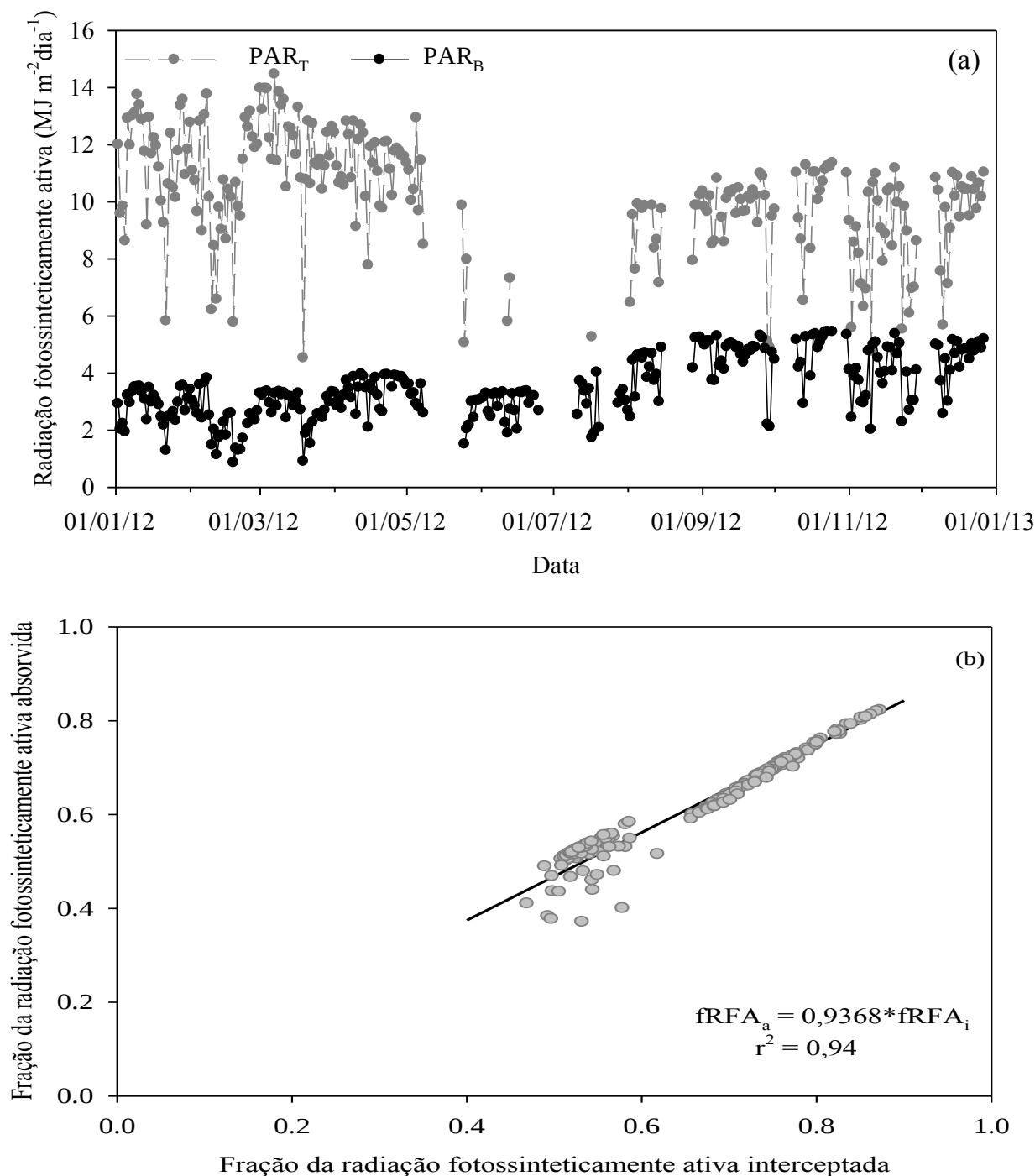


Figura 4. Comportamento (a) e relação (b) da fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada e absorvida pela vegetação da Caatinga, durante o ano de 2012, Petrolina-PE.

Variação Horária dos Componentes do Balanço de Radiação

Para análise horária dos componentes do balanço de radiação foram selecionados quatro dias com condições semelhantes, todavia com níveis de cobertura do solo distintos: 07/03/2012, 19/03/2012, 25/10/2012 e 10/11/2012. Observa-se que a radiação solar global (Q_g), no horário de 11h30 às 13h30, apresentou valores iguais a $1.112 \pm 40 \text{ W m}^{-2}$, para o dia 07/03/2012 (Figura 5), que mostrou-se pouco superior ao observado no dia 25/10/2012 ($1.050 \pm 20 \text{ W m}^{-2}$) (Figura 7), e em ambos os dias pode-se constatar um baixo desvio padrão, que caracteriza condições de céu claro.

O maior percentual do nível de cobertura do solo observado em 07/03/2012 resultou em uma menor temperatura do solo para o período de 11h30 às 13h30 ($T_s = 38,56^\circ\text{C}$) que se traduziu em menores valores de radiação de ondas longas emitida pela superfície média diária e consequentemente do balanço de ondas longas ($BOL = -113,5 \text{ W m}^{-2}$) quando comparado ao dia 25/10/2012 ($BOL = -147,6 \text{ W m}^{-2}$), em que a T_s foi $45,18^\circ\text{C}$. Este comportamento não foi observado de forma direta no saldo de radiação já que a intensidade de radiação solar incidente foi superior no dia (07/03/2012). Assim, foram observados valores médios do saldo de radiação (R_n), para o intervalo de 11h30 às 13h30, iguais a 870 W m^{-2} e 798 W m^{-2} , com valores diários iguais a $21,74 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $20,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,

respectivamente, para os dias 07/03/2012 e 25/10/2012. Em termos diários os maiores valores de Q_g ocorreram no mês de janeiro, entre 11 e 13 horas (local), quando atingiram até 1.200 W m^{-2} .

Santos et al. (2012) analisando o balanço de radiação sobre a caatinga nos anos de 2004 e 2005, encontraram maiores valores de Q_g em torno de 900 W m^{-2} para o mesmo intervalo e mês.

Em dias nublados (Figuras 6 e 8) pode-se constatar que no horário entre 11h30 e 13h00 a média da radiação solar incidente foi de $218,8 \pm 79 \text{ W m}^{-2}$ e $387,7 \pm 100 \text{ W m}^{-2}$ para os dias 19/03/2012 e 10/11/2012, respectivamente. Neste caso, também foi verificado maior valor da temperatura da superfície do solo no dia 10/11/2012 ($27,1^\circ\text{C}$) quando comparado ao dia 19/03/2012 ($24,1^\circ\text{C}$), comportamento este, que se traduziu em um aumento nos valores dos componentes do balanço de ondas longas no intervalo de 11h30 e 13h00, que foram iguais a $-46,1 \pm \text{W m}^{-2}$ e $-7,03 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente. Com saldo de radiação médio para o período de $190,9 \pm 68,71 \text{ W m}^{-2}$ e $295,1 \pm 81,9 \text{ W m}^{-2}$ para as duas datas na ordem em que foram citadas.

Para a radiação refletida (Q_r) constatou-se que nos dias de céu claro (Figuras 5 e 7) os valores atingiram picos máximos próximos às 12h em torno de 100 W m^{-2} e mínimos em torno do amanhecer e entardecer. Nos dias nublados, o comportamento de Q_r foi altamente variável com valores máximos em torno de

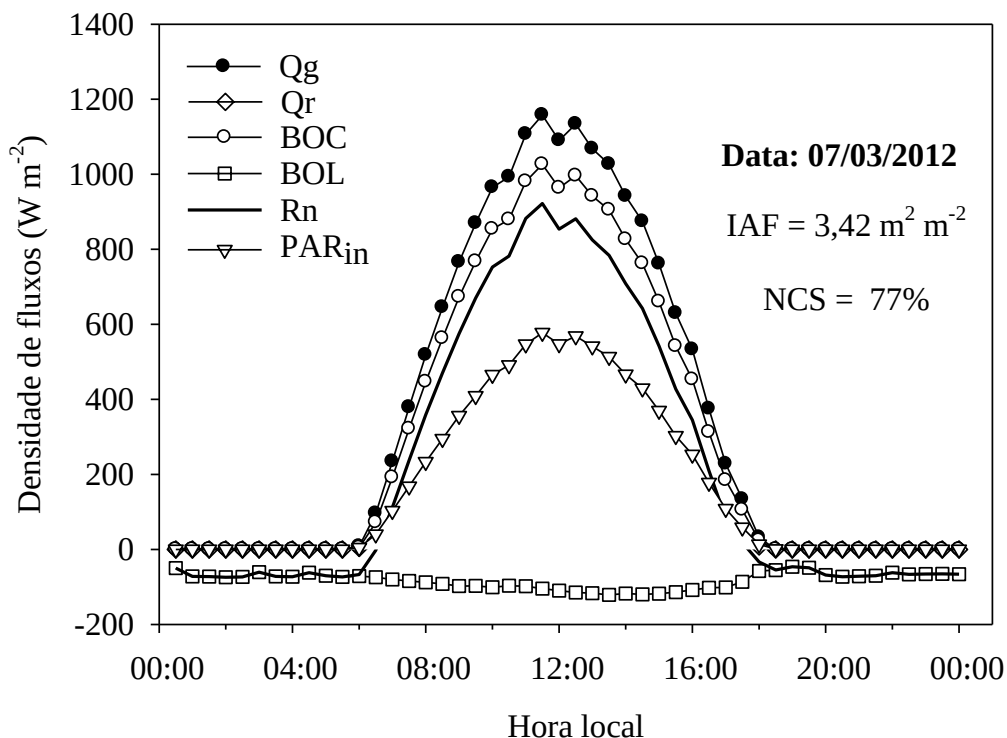


Figura 5. Variação horária dos componentes do balanço de radiação em dias de céu claro e nível de cobertura vegetal alto, durante o ano de 2012, Petrolina-PE.

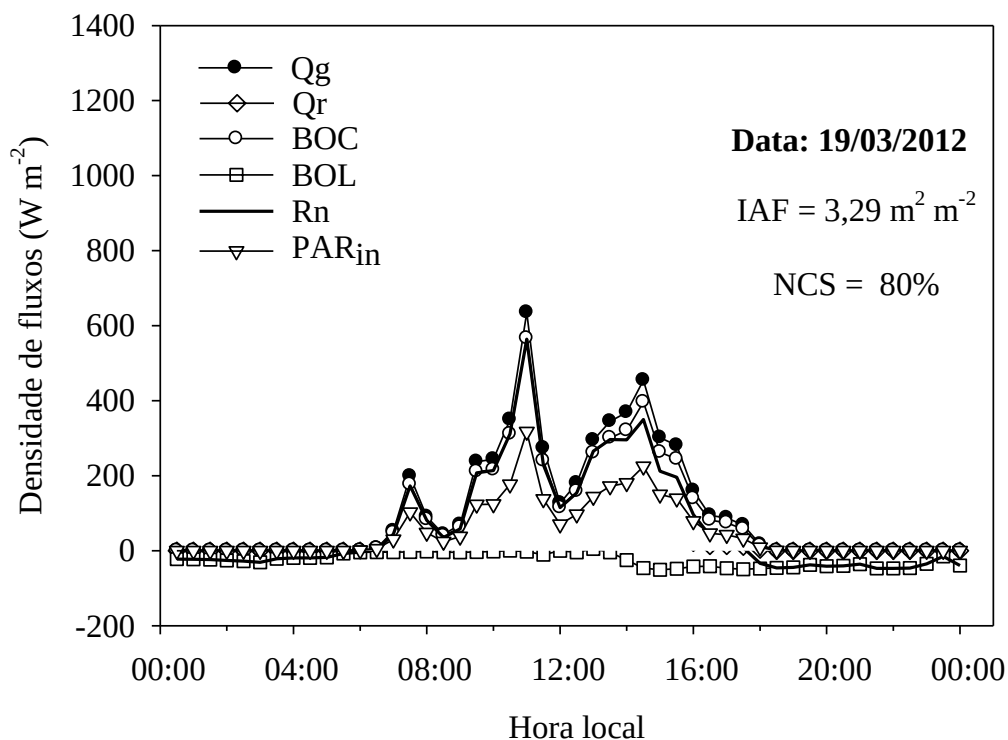


Figura 6. Variação horária dos componentes do balanço de radiação em dias de céu nublados com nível de cobertura vegetal alto, durante o ano de 2012, Petrolina-PE.

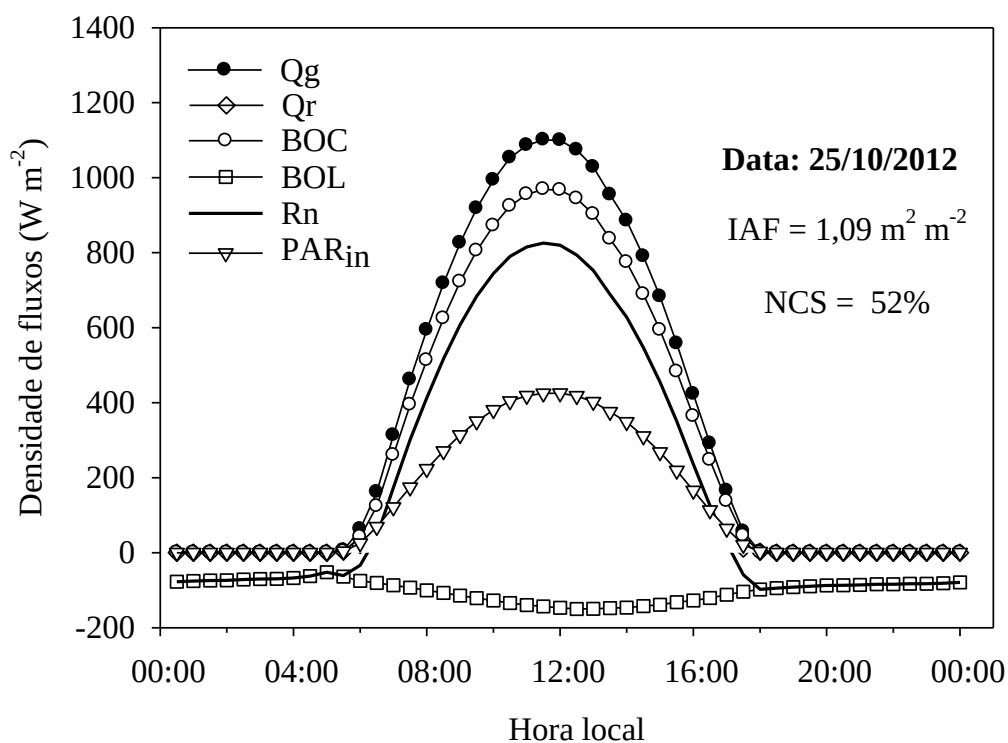


Figura 7. Variação horária dos componentes do balanço de radiação em dias de céu claro, com nível de cobertura vegetal baixo, durante o ano de 2012, Petrolina-PE.

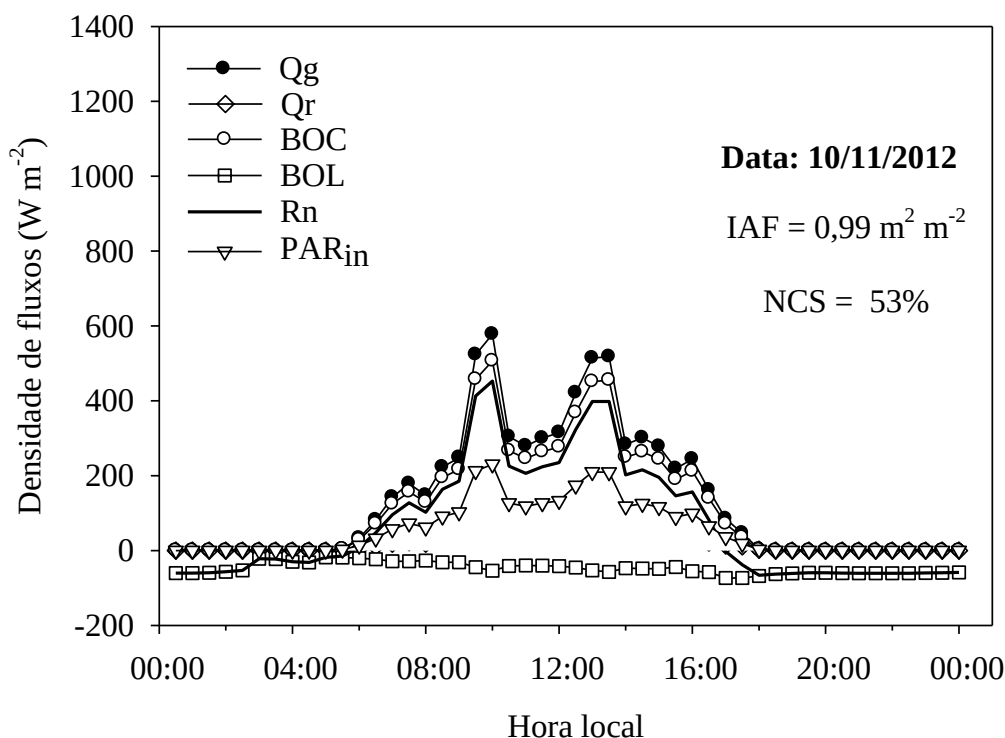


Figura 8. Variação horária dos componentes do balanço de radiação em dias de céu nublados com nível de cobertura vegetal baixo, durante o ano de 2012, Petrolina-PE.

Variação Sazonal dos Componentes do Balanço de Radiação

O comportamento dos componentes do balanço de radiação durante o período estudado é apresentado na Figura 9. Observa-se que a relação entre os componentes do balanço de radiação variaram em resposta ao nível de cobertura do solo, sazonalidade do suprimento de energia e conteúdo de água (Silva et al., 2011). Foi constatada alta incidência de radiação solar (Q_g) durante o início do ano, com valor médio de janeiro a março de $22,49 \pm 3,89 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, com tendência à redução a partir do mês de abril e durante os dias em que houve eventos de chuvas, sendo este mesmo comportamento verificado para o saldo de radiação (Figura 9b). Posteriormente, observa-se o aumento gradativo da Q_g a partir do mês de setembro em decorrência da mudança das estações do ano. Essa sazonalidade da radiação é uma característica comum da região e é esperada uma vez que este elemento meteorológico depende da latitude e fatores como: características da superfície, transmissividade atmosférica, etc (Santos et al., 2012).

A radiação solar refletida apresentou valores baixos durante todo o ano com mínimos em torno de $0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e máximos próximos a $4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. As

maiores variações foram constatadas no início de 2012, quando havia mudanças na composição da superfície, posteriormente, com a senescência foliar da maioria das espécies estes valores tornaram-se levemente mais incrementados e praticamente constantes.

Quando analisada a Figura 9a observou-se que a radiação de ondas longas atmosférica (Q_a) e emitida pela superfície (Q_s) apresentou um leve incremento da Q_s a partir do mês de setembro. Este comportamento está associado ao fato de que este parâmetro oscila principalmente em função da temperatura da superfície do solo (T_s). Neste caso, uma redução do índice de cobertura vegetal observado neste período, resultou em um aumento da T_s a qual passou a atingir valores médios diários de 36°C , ocasionando uma tendência de aumento da Q_s . Este incremento por sua vez se traduziu em uma redução nos valores de BOL (Figura 9b). Resultados semelhantes foram observados por Silva et al. (2011) em um canal na mesma região.

O balanço de ondas curtas (BOC) por outro lado, foi influenciado principalmente devido à Q_g , uma vez que a radiação refletida atingiu valores muito baixos (Figura 9b).

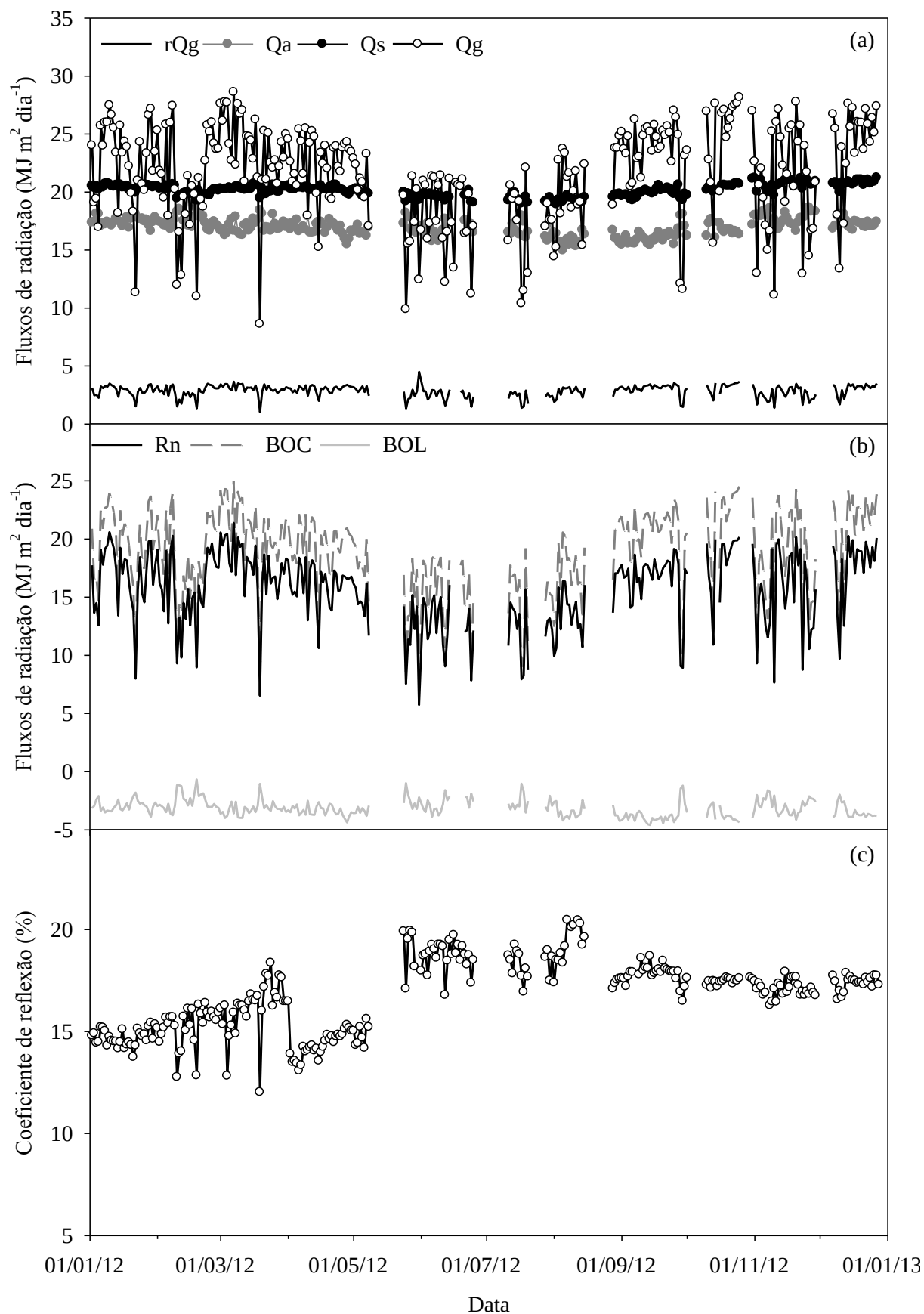


Figura 9. Comportamento sazonal médio dos componentes do balanço de radiação (a): radiação solar refletida (Q_r), radiação solar global (Q_g), radiação de ondas longas emitida pela atmosfera (Q_a), radiação de ondas longas emitida pela superfície (Q_s), saldo de radiação (R_n), balanço de ondas curtas (BOC) e balanço de ondas longas (BOL) (b) e do coeficiente de reflexão (c) em uma área de Caatinga preservada durante um ano seco em Petrolina-PE, 2012.

Analisando-se o coeficiente de reflexão para a área de caatinga preservada durante o ano de 2012 observa-se que o ano iniciou com valores de albedo em torno de 15%, quando o nível de cobertura do solo era alto, em torno de 75% e, portanto, havia menor exposição da superfície do solo (Figura 9c). Em alguns dias do mês de fevereiro e março, quando foram constatados eventos de precipitação observou-se uma pequena redução nos valores de albedo, que atingiram valores próximos a 13%. Nos meses seguintes constatou-se o aumento do albedo, que alcançou 20% no mês agosto com valor médio anual de $17 \pm 1,6\%$. Neste caso, uma maior exposição da superfície do solo seco em associação com a coloração clara dos troncos e galhos, característica da vegetação de caatinga podem ter propiciado o aumento deste parâmetro.

Teixeira et al. (2008) em estudo realizado em uma área de Caatinga nesta mesma região, encontraram valores médios anuais da fração Qr/Qg iguais a 14% no ano de 2004 e de 13% no ano de 2005. Silva et al. (2005) fazendo o uso de técnicas de sensoriamento remoto para determinar o albedo de diferentes coberturas da superfícies nas regiões de Petrolina e Juazeiro encontraram valores de albedo que oscilaram entre 20 e 30% para a Caatinga. Cunha et al. (2013) em estudo realizado para uma área de caatinga em Petrolina-PE encontraram valores de albedo que oscilaram entre 12 e 16%, obtidos por meio de uma torre micrometeorológica no período de julho de 2004 a junho de 2005. Estes mesmos autores encontraram variações entre 14-18% nos valores médios mensais deste parâmetro com a utilização do sensor MODIS no período de 2004 a 2007 (Cunha et al., 2013). Varejão-Silva (2006) citam que os valores de albedo são dependentes da superfície estudada e que, no caso de superfícies recobertas com vegetação os valores deste parâmetro podem oscilar em decorrência das características da vegetação como espécie, estágio de desenvolvimento, arquitetura foliar e índice de área foliar. Assim, as diferenças entre os valores relatados no presente estudo e os obtidos por outros autores pode estar associada à diminuição antecipada da cobertura vegetal e redução da precipitação observadas no ano de 2012, ou seja, em função da condição de seca.

Conclusões

Os maiores valores diários da radiação solar global ocorreram em janeiro entre as 11 e 13h local.

As mudanças observadas na vegetação de caatinga durante um ano de extrema seca influenciaram no padrão de resposta da vegetação em termos de radiação refletida e emitida pelo dossel, e por sua vez, no balanço de radiação à superfície.

A RFA incidente na vegetação apresentou variação intranual em decorrência das mudanças das estações do ano com valores máximos diários entre janeiro e abril.

A fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela vegetação da caatinga pode ser utilizada em substituição da fração da radiação fotossinteticamente absorvida, quando não for possível sua determinação em campo.

Os valores de albedo no ano de 2012 foram influenciados pela seca da região atingindo valores médios iguais a 17%.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo auxílio financeiro junto ao Edital de número 14/2011, processo nº: 483223/2011-5, à Embrapa Semiárido, e a Universidade Federal Viçosa - UFV.

Referências

- Abraha, M.G., Savage, M.J., 2008. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology* v. 148, 401-416.
- Assis, F. N., Mendez, M. E., 1989. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 24, 7., 797-800.
- Balochi, D.D., Valentini, R., Running, S., Oechels, W., Dahlen, R., 1996. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 2, 159-168.
- Bat-Oyun, T., Shinoda, M., Tsubo, M. 2012. Effects of cloud, atmospheric water vapor, and dust on photosynthetically active radiation and total solar radiation in a Mongolian grassland. *Journal of Arid Land*. 4, 4, 349-356.
- Castelletti, C.H.M., Silva, J.M.C., Tabarelli, M., Santos, A.M.M., 2004. Quanto ainda resta da Caatinga? uma estimativa preliminar. In: Silva, J.M.C., Tabarelli, M., Fonseca, M.T., Lins, L.V. (Orgs.), *Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, pp. 91-100.
- CPTEC. Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos, 2012. Disponível: <http://www.cptec.inpe.br>. Acesso: 03 set. 2014.
- Cunha, A.P.M.do.A., Alvalá, R.C.dos.S., Oliveira, G.S., 2013. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 28, 139 - 152.
- EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2013. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido. Médias anuais da Estação Agrometeorológica de Bebedouro. Petrolina. Disponível: <http://www.cpsa.embrapa.br:8080/servicos/dados/met/ceb-anual.html>. Acesso: 17 ago. 2014.
- Fontana, D. C., Alves, G. M., Roberti, D., Moraes, O. L. L., Gerhardt, A. (2012). Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura da soja através de dados do sensor Modis. *Revista Bragantia*, Campinas, 71,4, 563-571, 2012.
- Giambelluca, T.W., Scholz, F.O.G., Bucci, S.J., Meinzer, F.C., Goldstein, G., Hoffmann, W.A., Franco, A.C., Buchert, M.P., 2009. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian

- savannas with contrasting tree density. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1365-1376.
- Gower, S.T., Kucharik, C.J., Norman, J.C., 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, f PAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 70, 29-51.
- Gutiérrez, A.P.A., Engle, N.L., Nys, E.D., Molejón, C., Martins, E.S., 2014. Drought preparedness in Brazil. *Weather and Climate Extremes* 3, 95-106.
- Jacovides, C.P., Tymvios, F. S., Asimakopoulou, K. L., Theofilou, K. M., Pashiardes, S. 2003. Global photosynthetically active radiation and its relationship with global solar radiation in the Eastern Mediterranean basin. *Theoretical and Applied Climatology*. 74, 227-233.
- Kato, T., Tang, Y., Gub, S., Cui, X., Hirota, M., Du, M., Li, Y., Zhao, X., Oikawa, T., 2004. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology* 124, 121-134.
- Krishnan, P., Meyers, T.P., Scott, R.L., Kennedy, L., Heur, M., 2012. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semi-arid grasslands in North America. *Agricultural and Forest Meteorology* 152, 31-44.
- Moura, M.S.B., Galvêncio, J.D., Brito, L.T.de., Souza, L.S.B.de., Sá, I.I.S., Silva, T.G.F.da., 2007. 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, pp. 37-59.
- Müller, A.G., Bergamaschi, H., 2005. Eficiências de interceptação, absorção e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas e verificação do modelo energético de estimativa da massa seca acumulada. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 13, 27-33.
- Nobre, P., Melo, A.B.C., 2001. Variabilidade climática intrasazonal sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000. *Revista Climanálise*. Disponível: http://www6.cptec.inpe.br/revclima/revista/pdf/artigo_variabilidade_dez01.pdf. Acesso: 20 ago. 2014.
- Novick, K.A., Stoy, P.C., Katul, G.G., Ellsworth, D.S., Siqueira, M.S.B., Juang, J., Oren, R., 2004. Carbon dioxide and water vapor exchange in a warm temperate grassland. *Oecologia*, 138, 259-274.
- Oliveira, M.B.L., Santos, A.J.B., Manzi, A.O., Alvalá, R.C.S., Correia, M.F., Moura, M.S.B., 2006. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 166-174.
- Paiva, C.M., 2005. Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, UFRJ.
- Pereira, A.R.; Angelocci, L.R.; Sentelhas, P.C. 2002. *Agrometeorologia – fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Ed. Agropecuária. 478p.
- Querino, C.A.S., Moura, M.A.L., Querino, J.K.A.S.Q., Von Randow, C., Marques Filho, A.O., 2011. Estudo da radiação solar global e índice de transmissividade (kt) externo e interno, em uma floresta de mangue em alagoas – Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 26, 204-294.
- Radin, B., Bergamaschi, H., Junior, C.R., Barni, N.A., Matzenauer, R., Didoné, I.A., 2003. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38, 1017-1023.
- Rotenberg, E.; Yakir, D. 2010. Contribution of semi-arid forests to the climate system. **Science**. v. 327, 451 p.
- Santos, S.de.A., Correia, M.de.F., Aragão, M.R.da.S., Silva, P.K.de.O., 2012. Aspectos da variabilidade sazonal da radiação, fluxos de energia e CO₂ em área de Caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física* 4, 761-773.
- Silva, B.B.da., Lopes, G. M., Azevedo, P. V. 2005. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens LANDSAT 5-TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 13, 2, 11-21.
- Silva, T.G.F. da., Moura, M.S.B., Zolnier, S., Soares, J. M., Souza, L.S.B.de., Brandão, E.O., 2011. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)* 15, 139-147.
- Silva, T.G.F., Zolnier, S., Moura, M.S.B., Souza, L.S.B., 2013. Sazonalidade do Controle de Evapotranspiração pela Cana-de-Açúcar Irrigada e Características Aerodinâmicas da Cultura no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física* 6, 621-634.
- Souza, P.J.deO.P.de., Rocha, E.J.P.da., Ribeiro, A., Souza, E.B.de., 2010. Radiation balance in a soybean ecosystem in the Amazon. *Revista Ciência Agronômica* 41, 582-592.
- Souza, A. P., Escobedo, J. F. 2013. Estimativas da radiação global incidente em superfícies inclinadas com base na razão de insolação. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 8, 3, 483-491.
- Teixeira, A.H.C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, N.D., Moura, M.S.B. de., Bos, M.G., 2008. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology* 362, 110-127.
- Varejão-Silva, M. A. *Meteorologia e Climatologia*. 2006. Versão digital, 2. ed. Recife, 449 p.
- Wang, H., Jia, G., Fu, C., Feng, J., Zhao, T., Ma, Z., 2010. Deriving maximal light use efficiency from coordinated flux measurements and satellite data for regional gross primary production modeling. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2248-2258.
- Wang, H., Prentice, I. C., Davis, T. W. 2014. Biophysical constraints on gross primary production by the terrestrial biosphere. *Bioessences*, 11, 5987-6001.
- Yuan, W., Liu, S., Yu, G., Bonnefond, J.M., Chen, J., Davis, K., Desai, A.R.; Goldstein, A.H., Gianelle, D., Rossi, F., Suyker, A.E., Verma, S.B., 2010.

Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment* 114, 1416–1431.

Zhang, X., Gu, S., Zhao, X., Cui, X., Zhao, L., Xu, S., Du, M., Jiang, S., Gao, Y., Ma, C., Tang, Y., 2010.

Radiation partitioning and its relation to environmental factors above a meadow ecosystem on the Qinghai Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 115.