

LUCIANA SANDRA BASTOS DE SOUZA

**ANÁLISE SAZONAL DOS FLUXOS DE CARBONO, ENERGIA E VAPOR  
D'ÁGUA EM UM ECOSISTEMA DE CAATINGA DURANTE UM ANO SECO  
EM PETROLINA-PE**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2014

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

T

S725a  
2014 Souza, Luciana Sandra Bastos de, 1987-  
Análise sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub>, energia e vapor d'água sobre  
um ecossistema de caatinga preservada em um ano seco em  
Petrolina-PE / Luciana Sandra Bastos de Souza. - Viçosa, MG, 2014.  
xv, 89f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Caatinga - Nordeste - Brasil. 2. Vegetação - Dióxido de  
carbono. 3. Vegetação - Vapor d'água. I. Universidade Federal de  
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-graduação em Meteorologia Agrícola. II. Título.

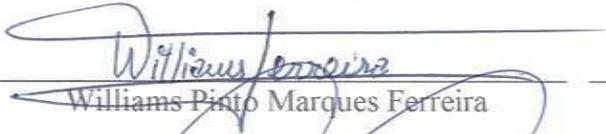
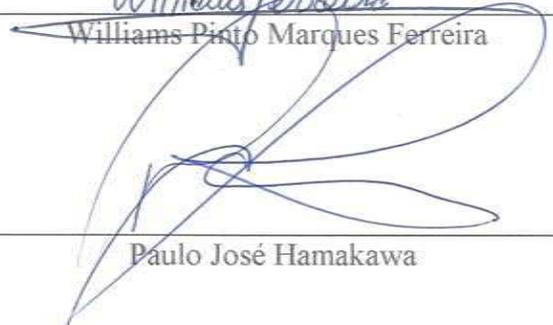
CDD 22. ed. 581.9098134

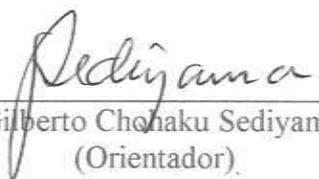
LUCIANA SANDRA BASTOS DE SOUZA

**ANÁLISE SAZONAL DOS FLUXOS DE CARBONO, ENERGIA E VAPOR  
D'ÁGUA EM UM ECOSSISTEMA DE CAATINGA DURANTE UM ANO SECO  
EM PETROLINA-PE**

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

APROVADA: 21 de novembro de 2014.

 Williams Pisto Marques Ferreira	 Luiz Gonsaga de Carvalho
 Paulo José Hamakawa	 Hemley Maria Acioli Imbuzeiro

  
Gilberto Chohaku Sedyama  
(Orientador).

## OFEREÇO

*Com amor e carinho aos meus pais, Carlos Otávio de Souza e Graciete Bastos da Silva Souza pelo amor que me dedicaram, pelos ensinamentos que me conduziram a perceber a importância de buscar os meus sonhos e por serem sempre minha fonte de inspiração e apoio diário.*

*Aos meus irmãos Hugo e Breno e a irmã Emanuelly, por todo o amor, amizade, carinho, incentivo, compreensão e conselhos nesta longa jornada.*

*À Dona Socorro Contente, ser humano muito especial e pessoa fundamental para a concretização deste trabalho.*

***EU AMO VOCÊS!***

*Dedico ao meu esposo pelo incentivo constante em toda a minha caminhada, pelo apoio incondicional, amor e companheirismo durante os anos juntos.  
Ao meu filho pelo amor e por fazer parte de minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a uma “Força Suprema” que, quando pequena, fui ensinada a chamar de Deus. Pela força divina que tem me oferecido, para enfrentar os desafios e obstáculos, sempre com muita perseverança e tendo em mente que nada é impossível quando realmente desejamos.

Ao meu orientador, professor Gilberto Sedyama, pela dedicação, ensinamentos, competência, respeito, profissionalismo, principalmente pela oportunidade e por acreditar em mim.

À minha conselheira Magna Soelma Beserra de Moura, pelo profissionalismo e amizade, que sempre, com muita sabedoria, discernimento, bom senso e dedicação, me auxiliaram no cumprimento de mais esta etapa.

A Saulo Tarso Aidar, pela colaboração indispensável na realização das medidas fisiológicas, pelo profissionalismo, dedicação e, principalmente, pela boa vontade demonstrados ao longo da realização dos trabalhos.

Ao professor Bernardo Barbosa da Silva, pela colaboração.

À minha avó Maria Edite da Silva e ao casal Jaqueline e Josafá, por todos os momentos juntos desde as horas mais felizes às mais tensas, pelas conversas e pelo apoio constante durante essa etapa de minha vida.

Aos queridos Gildemar, Edenilde e Taciana, pelas conversas agradáveis, força em cada momento e carinho sincero.

À “Tia” Socorro e toda a família Gomes da Trindade, pela amizade sincera e confiança que sempre me dedicaram.

Aos amigos Valéria Hollunder, Luciano, Yhasmin Paiva, Hugo Rody que estiveram juntos durante toda a minha permanência em Viçosa, pela companhia agradável e amizade indispensável em cada momento.

Aos colegas da Embrapa Semiárido, especialmente aos funcionários do campo experimental da Caatinga e aos colegas Gilson Dennys, Leide Dayane, Iris Diniz, pela colaboração.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade concedida e pela excelente infraestrutura de ensino e pesquisa.

À Embrapa Semiárido, pela concessão da infraestrutura para realização deste trabalho.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

LUCIANA SANDRA BASTOS DE SOUZA, filha de Carlos Otávio de Souza e Graciete Bastos da Silva Souza, nasceu em 25 de outubro de 1987, na cidade de Floresta, estado de Pernambuco.

Concluiu o ensino médio em 2004, na Escola Otacílio Nunes de Souza, Petrolina. No mesmo ano foi aprovada no vestibular para o curso de Ciências Biológicas na Universidade Estadual de Pernambuco – Campus III em Petrolina-PE. Durante a graduação atuou na área de Agrometeorologia como bolsista de iniciação científica PIBIC/CNPq na Embrapa Semiárido. Durante esse período foi premiada por sua apresentação oral na II Jornada de Iniciação Científica da Embrapa. Posteriormente foi bolsista de outros programas de Pesquisa na referida instituição. Graduou-se em dezembro de 2008. Em março de 2009 iniciou o mestrado na Universidade Federal de Viçosa – UFV, na área de Meteorologia Agrícola, o qual concluiu em fevereiro de 2011. Posteriormente, em março do referido ano, iniciou o doutorado na mesma área e instituição, concluindo-o em dezembro de 2014.

## SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo geral.....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.2. Referências.....	4
CAPÍTULO 1 - BALANÇO DE RADIAÇÃO EM UMA ÁREA DE CAATINGA DURANTE UM ANO DE SECA NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
2.1. Localização e caracterização da área experimental.....	9
2.2. Medições micrometeorológicas.....	10
2.3. Componentes do balanço de radiação.....	11
2.4. Interação entre a vegetação e a radiação fotossinteticamente ativa.....	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
3.1. Variáveis ambientais.....	13
3.2. Interação entre a vegetação e a radiação fotossinteticamente ativa.....	13
3.3. Variação sazonal dos componentes do balanço de radiação.....	16
3.4. Variação horária dos componentes do balanço de radiação.....	18
4. CONCLUSÕES.....	21
5. REFERÊNCIAS.....	22
CAPÍTULO 2 - BALANÇO DE ENERGIA E CONTROLE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UM ECOSISTEMA DE CAATINGA DURANTE UM ANO SECO NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO.....	26
1. INTRODUÇÃO.....	27
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
2.1. Localização e caracterização da área experimental.....	29
2.2. Medições micrometeorológicas.....	29
2.3. Processamento e análise dos dados.....	30
2.4. Componentes do balanço de energia.....	32
2.5. Parâmetros do dossel da vegetação.....	32
2.6. Determinação da evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ).....	34
2.7. Determinação da evapotranspiração real da caatinga (ET <sub>r</sub> ).....	35

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
3.1. Caracterização micrometeorológicas .....	35
3.2. Análise sazonal dos componentes do balanço de energia.....	36
3.3. Fechamento do balanço de energia .....	39
3.4. Variação sazonal e controles da evapotranspiração .....	41
4. CONCLUSÕES .....	44
5. REFERÊNCIAS.....	44
CAPÍTULO 3 - VARIAÇÃO SAZONAL DAS TROCAS DE CARBONO EM UMA	
ÁREA DE CAATINGA NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO	
DURANTE UM ANO SECO .....	
1. INTRODUÇÃO .....	50
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	52
2.1. Caracterização da área experimental.....	52
2.2. Medições micrometeorológicas .....	52
2.3. Elementos meteorológicos .....	53
2.4. Monitoramento do conteúdo de água no solo .....	53
2.5. Processamento, controle de qualidade e preenchimento de falhas dos dados.....	54
2.6. Particionamento dos fluxos de carbono no ecossistema: fluxo de carbono líquido	
(NEE), produção primária bruta (PPB) e respiração da caatinga.....	54
2.7. Estimativa da produtividade primária bruta.....	55
2.7.1. Modelagem da respiração diurna e noturna.....	55
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
3.1. Condições ambientais .....	56
3.2. Variação sazonal do Fluxo líquido de CO <sub>2</sub> (NEE), produtividade primária bruta	
do (PPB) e respiração do ecossistema (Re).....	58
3.3. Variação horária do fluxo líquido de CO <sub>2</sub> (NEE), produtividade primária bruta	
(PPB) e respiração do ecossistema (Re) e variáveis meteorológicas.....	62
4. CONCLUSÕES .....	64
5. REFERÊNCIAS.....	65
CAPÍTULO 4 - TROCAS GASOSAS FOLIARES DIÁRIAS DE ESPÉCIES NATI-	
VAS DA CAATINGA EM DIFERENTES ÉPOCAS DO ANO .....	
1. INTRODUÇÃO .....	69
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	70
2.1. Localização e caracterização da área experimental .....	70
2.2. Trocas gasosas.....	71
2.3. Determinação do índice de área foliar .....	72
2.4. Monitoramento do conteúdo de água no solo .....	73
2.5. Curso diário das condições microclimáticas e da evapotranspiração .....	73
2.6. Análise estatística.....	73

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
3.1. Disponibilidade hídrica do ecossistema e variação diurna dos elementos meteorológicos.....	74
3.2. Variação diurna e sazonal das trocas gasosas.....	78
3.3. Eficiência do uso da água.....	82
4. CONCLUSÕES.....	84
5. REFERÊNCIAS.....	85
CONCLUSÕES GERAIS.....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\alpha$	Albedo da superfície	-
A	Taxa fotossintética	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
A(y)	Fotossíntese diária integrada	$\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
A <sub>max</sub>	Capacidade fotossintética da vegetação	$\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$
BOC	Balanço de ondas curtas	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
BOL	Balanço de ondas longas	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
c <sub>p</sub>	Calor específico do ar seco	$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
D	Deslocamento do plano zero	M
ETr	Evapotranspiração real	$\text{mm dia}^{-1}$
fRFA <sub>a</sub>	Fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida	-
fRFA <sub>i</sub>	Fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada	-
G	Fluxo de calor no solo	$\text{W m}^{-2}$
$\gamma$	Constante psicrométrica	$\text{Pa K}^{-1}$
PPB	Produtividade primária bruta	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
g <sub>s</sub>	Condutância da estomática	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
H	Fluxo de calor sensível	$\text{W m}^{-2}$
IAF	Índice de área foliar	$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$
K	Constante de Von Karman	-
L	Calor latente de vaporização	$\text{KJ kg}^{-1}$
LE	Fluxo de calor latente	$\text{W m}^{-2}$
NCS	Nível de cobertura do solo	%
NEE	Fluxo líquido de carbono	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
$\Omega$	Fator de desacoplamento	-
P	Precipitação pluvial	$\text{mm d}^{-1}$
p <sub>a</sub>	Massa específica do ar	$\text{kg m}^{-3}$
q'	Umidade específica	$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Q <sub>g</sub>	Radiação solar global	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Q <sub>r</sub>	Radiação solar refletida	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Q <sub>a</sub>	Radiação de ondas longas atmosférica	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Q <sub>s</sub>	Radiação de ondas longas emitida pela superfície	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

Rn	Saldo de radiação	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
r <sub>a</sub>	Resistência aerodinâmica	s m <sup>-1</sup>
Re	Respiração do ecossistema	μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
RFA <sub>B</sub>	Radiação fotossinteticamente ativa incidente abaixo do dossel	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
RFA <sub>R</sub>	Radiação fotossinteticamente ativa refletida	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
RFA <sub>T</sub>	Radiação fotossinteticamente ativa incidente acima do dossel	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
r <sub>s</sub>	Resistência da superfície	s m <sup>-1</sup>
T	Temperatura do ar	°C
T <sub>s</sub>	Temperatura do solo	°C
u*	Velocidade de fricção	m s <sup>-1</sup>
U	Velocidade do vento na horizontal	m s <sup>-1</sup>
V	Velocidade do vento na vertical	m s <sup>-1</sup>
u <sub>2</sub>	Velocidade do vento a 2 metros de altura	m s <sup>-1</sup>
VPD	Déficit de pressão de vapor	kPa
Z	Altura da vegetação	m
z <sub>h</sub>	Altura da medida da umidade	m
z <sub>m</sub>	Altura de medida da velocidade do vento	m
z <sub>oh</sub>	Comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e vapor	m
z <sub>om</sub>	Comprimento da rugosidade que governa a transferência de momentum	m
A	Rendimento quântico aparente	μmol CO <sub>2</sub> μmol quantum <sup>-1</sup>
Δ	Declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água	kPa °C <sup>-1</sup>
E	Erro residual	-
ρ <sub>a</sub>	Densidade do ar	g m <sup>-3</sup>
ψ <sub>h</sub>	Fator de correção da estabilidade para o fluxo de calor	-
ψ <sub>m</sub>	Fator de correção de estabilidade para o fluxo de momentum	-

## RESUMO

SOUZA, Luciana Sandra Bastos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2014. **Análise sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub>, energia e vapor d'água sobre um ecossistema de caatinga preservada em um ano seco em Petrolina-PE.** Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama. Co-orientadores: Magna Soelma Beserra de Moura e Bernardo Barbosa da Silva.

Objetivou-se com este trabalho analisar o comportamento sazonal dos fluxos de carbono, energia e água, e dos padrões diurnos das trocas gasosas de espécies ocorrentes em uma área de Caatinga preservada. O experimento foi conduzido na Embrapa Semiárido (9,05° S; 40,19° W; 350m), no município de Petrolina, PE, durante o ano de 2012, que foi caracterizado climaticamente pela ocorrência de longo período de estiagem, quando choveu apenas 92 mm. Os fluxos de carbono, energia e água foram medidos usando o sistema *Covariância dos vórtices turbulentos* acoplado a uma torre micrometeorológica de 16 metros. Ao longo do tempo foram feitas medições do conteúdo de água no solo e do nível de cobertura do solo (NCS), bem como campanhas para determinação da variação diurna das trocas gasosas (fotossíntese, transpiração e condutância estomática) de cinco espécies de maior ocorrência na área experimental (*Poincianella microphylla* (Mart. ex G. Don) L. P. Queiroz, *Croton conduplicatus* Kunth, *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud., *Manihot pseudoglaziovii* (Pax & Hoffman), *Commiphora leptophloeos* (Mart.) Gillett). As campanhas foram realizadas em quatro datas, com diferentes disponibilidades hídricas, em intervalo de medições de 2 horas. A partir dos dados experimentais foi determinado o balanço de radiação e os fluxos de CO<sub>2</sub> (NEE), calor latente (LE), calor sensível (H) e de calor no solo, em escala sazonal e em dias específicos (a depender do NCS e das condições de nebulosidade), bem como as frações da radiação fotossinteticamente ativa absorvida e interceptada. A interação entre a atmosfera e a vegetação na troca de vapor d'água foi realizada por meio do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ), da resistência da superfície e aerodinâmica. Os valores de LE foram integrados para a obtenção da evapotranspiração real diária. Os dados do NEE foi particionado por meio da aplicação de modelos matemáticos para a determinação da produtividade primária bruta e da respiração do ecossistema. Os resultados revelaram que a sazonalidade da disponibilidade de água durante o ano de 2012 influenciou o padrão dos balanços de radiação e de energia, maximizando a relação H/Rn (~ 77%) (em que, Rn é o saldo de radiação). Assim, a evapotranspiração sob condições de seca

intensa foi dependente do déficit de pressão de vapor e do controle da superfície, demonstrando um forte acoplamento da vegetação com atmosfera ( $\Omega \sim 0,04$ ). Todavia, essa interação variou em resposta ao progresso da deficiência hídrica após os eventos de chuva, quando a eficiência de uso da água das espécies foi otimizada, mesmo com a intensa redução da assimilação de dióxido de carbono. As espécies *P. microphylla*, *C. conduplicatus*, *B. cheilantha*, e *M. pseudoglaziovii* apresentaram maior otimização do uso da água em função do horário do dia e das condições sazonais de disponibilidade hídrica. O ecossistema de Caatinga preservada atuou durante um ano climaticamente seco como uma fonte de carbono para a atmosfera, com uma emissão igual a  $468,18 \text{ gC m}^{-2}\text{ano}^{-1}$ .

## ABSTRACT

SOUZA, Luciana Sandra Bastos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2014. **Seasonal analysis of CO<sub>2</sub> fluxes, energy and water vapor over a Caatinga ecosystem preserved in a dry year in Petrolina.** Adviser: Gilberto Chohaku Sedyama. Co-advisers: Magna Soelma Beserra de Moura and Bernardo Barbosa da Silva.

The objective of this study was to analyze the seasonal behavior of the carbon, energy and water fluxes, and the diurnal patterns of gas exchange of species occurring in an area of Caatinga preserved. The experiment was conducted at Embrapa Semi-Arid (9,05° S; 40,19° W; 350m), in the city of Petrolina, PE, during the year 2012, which was characterized by the occurrence of climatically long period of drought, when rained only 92 mm. Fluxes of carbon, energy and water were measured using the Covariância dos vórtices turbulentos system coupled with a micrometeorological tower of 16 meters. Over time measurements of water content in soil and the coverage index (CI) were made, as well as campaigns to determine the diurnal variation of gas exchange (photosynthesis, transpiration and stomatal conductance) of the five most common species in the experimental area (*Poincianella microphylla* (Mart. ex G. Don) LP Queiroz, *Croton conduplicatus* Kunth, *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud., *Manihot pseudoglaziovii* (Pax & Hoffman), *Commiphora leptophloeos* (Mart.) Gillett). The campaigns were conducted in four different dates with different water availability in the range of measurements of two hours. From the experimental data we determined the radiation balance and CO<sub>2</sub> fluxes (NEE), latent heat (LE), sensible heat (H) and soil heat in seasonal scale and on specific days (depending on IC and of cloudy conditions), as well as the fractions of photosynthetically active radiation absorbed and intercepted. The interaction between the atmosphere and the vegetation in the exchange of water vapor was performed by means of the decoupling factor ( $\Omega$ ) of the surface resistance and aerodynamics. LE values were integrated to obtain the daily evapotranspiration. The data was partitioned NEE through the application of mathematical models for determination of the gross primary productivity and respiration of the ecosystem. The results revealed that the seasonality of water availability during the year 2012 influenced the pattern of the radiation balance and energy, maximizing H / R<sub>n</sub> ratio (~ 77%) (where, R<sub>n</sub> is the net radiation). Thus, evapotranspiration under conditions of severe drought was dependent on the vapor pressure and the surface control deficit,

demonstrating a strong coupling of the vegetation with the atmosphere ( $\sim 0.04 \Omega$ ). However, this interaction varied in response to the progress of water stress after rain events, when the efficiency of water use species was optimized, even with the intense reduction of the assimilation of carbon dioxide. The species *P. microphylla*, *C. conduplicatus*, *Cheilanthes* B. and *M. pseudoglaziovii* showed greater optimization of water use as a function of time of day and seasonal water availability conditions. The Caatinga ecosystem preserved acted during a climatically dry year as a source of carbon to the atmosphere, with an emission equal to  $468.18 \text{ gC m}^{-2}\text{year}^{-1}$ .

## INTRODUÇÃO GERAL

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; 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 km<sup>2</sup> 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<sup>h</sup>, 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 chuvos 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 têm influência direta sobre a posição e permanência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ao sul do Equador e conseqüentemente, na qualidade do período chuvoso da região Nordeste (MOURA et al., 2007; NOBRE; MELO, 2001).

Nos meses secos a demanda atmosférica torna-se substancialmente elevada, induzindo a ocorrência de estresse hídrico nas espécies vegetais, que pode ser potencialmente agravado em decorrência de mudanças nos padrões atmosféricos de larga escala, como observado no ano de 2012 quando a ocorrência do fenômeno Dipolo do Atlântico culminou em alterações no regime pluviométrico da região, e conseqüentemente na intensidade da seca (CPTEC, 2012; GUTIÉRREZ et al., 2014).

Sob essas condições a interação entre a atmosfera e a biosfera pode ser modificada. Uma das maneiras de compreender as respostas do ecossistema ao

ambiente é por meio do balanço de energia radiante representado pelas suas partições no fluxo de calor latente (LE), sensível (H) e de calor no solo (G) (KRISHNAN et al., 2012; CHEN et al., 2009), que é resultante de uma complexa interação entre superfície terrestre e a atmosfera, sendo governada pela natureza da superfície e pelos regimes de radiação e da umidade do solo (GIAMBELLUCA et al., 2009). As condições climáticas influenciam nas trocas de energia e massa dos ecossistemas, que por sua vez, exercem influência sobre o mesoclima quando interagem com os componentes do balanço de energia alterando a magnitude destes.

Inúmeros estudos foram realizados com o objetivo de analisar os fluxos de energia e massa em diferentes superfícies vegetadas bem como a dependência desses com relação às variáveis biofísicas e meteorológicas (CHEN et al., 2009; YANG et al., 2011). Para a Caatinga, no entanto, estudos dessa natureza são bastante escassos, destacando-se os trabalhos desenvolvidos por Oliveira et al. (2006) e Teixeira et al. (2008) que, em ambos os casos, os resultados expressam o comportamento do bioma em níveis de precipitação normal ou acima da média da região, sendo inexistentes quando relacionados às condições peculiares de seca extrema. Entender os processos que governam a transferência de energia e massa entre a superfície e atmosfera por meio do comportamento dos fluxos de energia e massa é de fundamental importância para melhor compreensão dos mecanismos que regem os ciclos da água e carbono, o desenvolvimento da camada limite, o tempo e o clima (WILSON et al., 2002).

Atualmente uma das grandes preocupações desse tipo de análise está relacionada aos possíveis efeitos do aumento da concentração de dióxido de carbono no clima global, no qual os ecossistemas terrestres (vegetação + solo) têm sido considerados grandes sumidouros de carbono (MACHADO, 2005). Nesse sentido, tem-se observado nos últimos anos, o aumento crescente na realização de estudos que visam analisar o balanço de carbono em diferentes espécies nativas ou cultivadas (SUYKER et al., 2003; CHEN et al., 2013; GILMANOV et al., 2007). Esses estudos compreendem a troca líquida de carbono de um ecossistema (NEE), que resulta da diferença entre o CO<sub>2</sub> atmosférico que é assimilado na fotossíntese, ou produtividade primária bruta (PPB), e o que é liberado pela vegetação por meio da respiração (Re) (DESAI et al., 2008; GILMANOV et al., 2007).

Em ambientes passíveis da ocorrência de secas a disponibilidade hídrica pode acarretar em alterações no padrão fonte/dreno dos ecossistemas (CIAIS et al., 2005). Além disso, a realização de medidas das trocas gasosas foliares fornece subsídios para a

melhor compreensão da interação entre a biosfera-atmosfera, bem como de possíveis mecanismos de ajustes das plantas aos elementos meteorológicos estressantes. O conhecimento dessas variáveis fisiológicas possibilita o entendimento de como as espécies vegetais conseguem se estabelecer nesse ambiente, exteriorizando fenótipos condicionados pela manifestação do seu genótipo, permitindo-lhes a permanência e, portanto, a sua evolução nos diversos ambientes, muitas vezes considerados inóspitos e inviáveis à sobrevivência. Estudos ecofisiológicos de espécies da caatinga são limitados (SILVA et al., 2004; TROVÃO et al., 2007) e muitos deles foram realizados em casa de vegetação (NOGUEIRA; SILVA, 2002), o que reforça a importância de sua aplicação nesse bioma visando uma melhor compreensão de sua dinâmica. Além disso, enfatiza-se sua relevância em estudos de modelagem, seja climática (PAIVA, 2005), de estimativa de biomassa (ABRAHA; SAVAGE, 2008) ou de sequestro de carbono (KATO et al., 2004; WANG et al., 2010; YUAN et al., 2010).

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Analisar o comportamento sazonal dos fluxos de carbono, energia e vapor d'água, e dos padrões diurnos das trocas gasosas em uma área de Caatinga preservada durante um ano seco em Petrolina-PE.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Quantificar os componentes do balanço de energia radiante e suas partições em uma área de Caatinga por meio de medições micrometeorológicas.
- Determinar o comportamento da evapotranspiração associado a fatores biofísicos.
- Analisar a partição do balanço de carbono.
- Quantificar a fixação de carbono para a Caatinga, por meio das produtividades líquida, bruta e da respiração do bioma.
- Analisar o comportamento diurno das trocas gasosas de espécies da Caatinga em diferentes épocas.

## 1.2. Referências

ABRAHA, M. G.; SAVAGE, M. J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 3, p. 401-416, 2008.

CASTELLETTI, C.H.M., J.M.C. SILVA, M. TABARELLI & A.M.M. SANTOS. **Quanto ainda resta da Caatinga? Uma estimativa preliminar**. In: J.M.C. Silva, M. Tabarelli, M.T. Fonseca & L.V. Lins (orgs.). Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação. pp. 91-100. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2004.

CHEN, S.; CHEN, J.; LIN, G.; ZHANG, W.; MIAO, H.; WEI, L.; HUANG, J.; HAN, X. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 149, n. 11, p. 1800-1809, 2009.

CHEN, W.; WOLF, B.; ZHENG, X.; YAO, Z.; BUTTERBACH-BALH, K.; BRUGGEMANN, N.; HAN, S.; LIU, C.; HAN, X. Carbon dioxide emission from temperate semiarid steppe during the non-growing season. **Atmospheric Environment**. v. 64, p. 141-149, 2013.

CIAIS, P.; REICHSTEIN, M.; VIOVY, N.; GRANIER, A.; OGEE, J. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. **Nature**. v. 437, p. 529-533, 2005.

CPTEC. **Centro de Previsões de tempo e Estudos Climáticos**. <http://www.cptec.inpe.br> (accessado em: 03.09.2014)

DESAI, A. R.; RICHARDSON, A. D.; MOFFAT, A.M.; KATTGE, J.; HOLLINGER, D.Y.; BARR, A.; FALGE, E.; NOORMETS, A.; PAPALE, D.; REICHSTEIN, M.; STAUCH, V.J. Cross-site evaluation of eddy covariance GPP and RE decomposition techniques. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 148, p. 821-838, 2008.

GIAMBELLUCA, T. W., SCHOLZ, F. G., BUCCI, S. J., MEINZER, F. C., GOLDSTEIN, G., HOFFMANN, W. A., FRANCO, A. C., BUCHERT, M. P. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1365-1376, 2009.

GILMANOV, T.G.; SOUSSANA, J.F.; AIRES, L.; ALLARD, V.; AMMAN, C.; BALZAROLO, M.; BARCZA, Z.; BERNHOFER, C.; CAMPBELL, C.L.; CERNUSCA, L.; CESCATTI, A.; CLIFTIN-BROW, J.; DIRKS, B.O.M.; DORE, S.; EUGESTER, W.; FUHRER, J.; GIMENO, C.; GRUENWALD, T.; HASZPRA, L.; HENSEN, A.; IBROM, A.; JACOBS, A.F.G.; JONES, M.B.; LANIGAN, G.; LAURILA, T.; LOHILA, A.; MANCA, G.; MARCOLLA, B.; NAGY, Z.; PILEGAARD, K.; PINTER, K.; PIO, C.; RASCHI, A.; ROGIERS, N.; SANZ, N.J.; STEFANI, P.; SUTTON, M.; TUBA, Z.; VALENTINI, R.; WILLIAMS, M.L.; WOHLFAHRT, G. Partitioning European grassland net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function. **Agriculture Ecosystems and Environment**. v. 121, p. 90-120, 2007.

GUTIÉRREZ, A. P. A.; ENGLE, N. L.; NYS, E. D.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E. S. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95-106, 2014.

KATO, T.; TANG, Y.; GUB, S.; CUI, X.; HIROTA, M.; DU, M.; LI, Y.; ZHAO, X.; OIKAWA, T. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, p. 121-134, 2004.

KRISHNAN, P.; MEYERS, T. P.; SCOTT, R. L.; KENNEDY, L.; HEUER, M. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semi-arid grasslands in North America. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 152, p. 31-44, 2012.

MACHADO, P. L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, São Paulo, 2005.

MOURA, M. S. B. ; GALVÍNCIO, J. D. ; BRITO, L. T. de L.; SOUZA, L. S. B. de ; SÁ, I. I. S. ; SILVA, T. G. F. da . **Clima e água de chuva no Semi-Árido**. In: BRITO, L.T.L.; MOURA, M.S.B.; GAMA, G.F.B.. (Org.). Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro. 1 ed. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007, v. 1, p. 37-59.

NOBRE, P.; MELO, A. B. C. Variabilidade Climática Intrasazonal Sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000. **Revista Climanalise**, 2001. Cachoeira Paulista, SP. Disponível em: [http://www6.cptec.inpe.br/revclima/revista/pdf/artigo\\_variabilidade\\_dez01.pdf](http://www6.cptec.inpe.br/revclima/revista/pdf/artigo_variabilidade_dez01.pdf)>. Acesso em: 20 de agosto de 2014.

NOGUEIRA, R. J. M. C. & SILVA, E.C. Comportamento estomático em plantas jovens de *Schinopsis brasiliensis* Engl. Cultivadas sob estresse hídrico. **Iheringia, Série Botânica** v. 57, p. 31-38, 2002.

NOVICK, K. A.; STOY, P. C.; KATUL, G.G.; ELLSWORTH, D. S.; SIQUEIRA, M. S.B.; JUANG, J.; OREN, R. Carbon dioxide and water vapor exchange in a warm temperate grassland. **Oecologia**. v. 138, n. 2, p. 259-274, 2004.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, 166-174, 2006.

ROTENBERG, E.; YAKIR, D. **Contribution of semi-arid forests to the climate system**. Science. v. 327, 451p, 2010.

SILVA, E. C. da.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; AZEVEDO NETO, A. D. de.; BRITO, J. Z. de.; CABRAL, E. L. Aspectos ecofisiológicos de dez espécies em uma área de caatinga no município de Cabaceiras, Paraíba, Brasil. **IHERINGIA, Série Botânica**, Porto Alegre, v. 59, n. 2, p. 201-205, 2004.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; BURBA, G. G. Interannual variability in net CO<sub>2</sub> exchange of a native tallgrass prairie. **Global Change Biology**. v. 9, p. 255-265, 2003.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, N. D.; MOURA, M. S. B. DE; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, p. 110-127, 2008.

TROVÃO, D. M. B. M.; FERNANDES, P. D.; ANDRADE, L. A.; DANTAS NETO, J. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 11, p. 307–311, 2007

WANG, H.; JIA, G.; FU, C.; FENG, J.; ZHAO, T.; MA, Z. Deriving maximal light use efficiency from coordinated flux measurements and satellite data for regional gross primary production modeling. **Remote Sensing of Environment**. v. 114, p. 2248-2258, 2010.

WILSON, K.; GOLDSTEIN, A.; FALGE, E.; AUBINET, M.; BALDOCCHI, D.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; CEULEMANS, R.; DOLMAN, H.; FIELD, C.; GRELLÉ, A.; IBROM, A.; LAW, B. E.; KOWALSKI, A.; MEYERS, T.; MONCRIEFF, J.; MONSON, R.; OECHEL, W.; TENHUNEN, J.; VALENTINI, R.; VERMA, S. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorologic**. v. 113, p. 223-243, 2002.

YANG, F.; ZHOU, G.; HUNT, J. E.; ZHANG, F. Biophysical regulation of net ecosystem carbon dioxide exchange over a temperate desert steppe in Inner Mongolia, China. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v. 142, p. 318-328, 2011.

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. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 1416–1431, 2010.

## CAPÍTULO 1

### BALANÇO DE RADIAÇÃO EM UMA ÁREA DE CAATINGA DURANTE UM ANO DE SECA NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

**RESUMO:** Objetivou-se com este trabalho 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 a 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 no interior do dossel da caatinga. Os 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 incidente à superfície e do saldo de radiação que atingiram valores médios diários em torno de  $23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , respectivamente. Observou-se que a magnitude dos valores dos componentes do balanço de radiação foi afetada principalmente em decorrência da nebulosidade e mudanças sazonais na vegetação que afetaram, principalmente, os níveis de emitância da superfície e sua reflexão. No que se refere às frações da radiação fotossinteticamente ativa interceptada e absorvida, observou-se que as mesmas apresentaram valores médios diários bastante próximos ao longo do ano, os quais foram iguais a 0,69 e 0,64, nesta ordem. Estes resultados podem ser extremamente úteis para uma melhor compreensão da interação entre a caatinga e a atmosfera sob condições climáticas singulares e, portanto, serem utilizados na formulação de políticas climáticas. **Palavras-chave:** saldo de radiação, radiação fotossinteticamente ativa, vegetação de Caatinga.

### RADIATION BALANCE IN CAATINGA ECOSYSTEM PRESERVED FOR A YEAR DROUGHT IN SEMIARID PERNAMBUCANO

**ABSTRACT:** The aim of this study was to analyze the daily and seasonal variations of the components of the radiation balance and photosynthetic active radiation to the caatinga during a dry year in semiarid Pernambuco. 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 radiometer CNR1 balance one installed template to the 13.3 meters of the surface was used. Additionally, we analyzed the interaction between vegetation and radiation by means of sensors for monitoring radiation and photosynthetically active up in different positions below the canopy of the savanna. These data were used to calculate the fraction of photosynthetically active radiation intercepted ( $fRFA_i$ ) and absorbed ( $fRFA_a$ ). A wide seasonal variation of global solar radiation and net radiation that reached daily averages around  $23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  was observed and  $15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , respectively. In this case, it was observed that the magnitude of the values of the components of the radiation balance was affected mainly due to cloudiness and changes in vegetation which mainly affected the levels of

surface emittance and its reflection. With respect to the fractions of photosynthetically active radiation intercepted and absorbed, it was observed that they had daily throughout the year very similar mean values, which were equal to 0.69 and 0.64 in order. These data can be extremely useful for a better understanding of the interaction between the savanna and the atmosphere under natural climatic conditions, and therefore, be used in the formulation of climate policy.

## 1. INTRODUÇÃO

A vegetação de caatinga está presente no Semiárido brasileiro e compreende o único Bioma exclusivo do País (SANTOS et al., 2012). O Bioma Caatinga ocupa uma área de aproximadamente 844.000 km<sup>2</sup>, que abrange os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, a maior parte da Paraíba e Pernambuco, sudeste do Piauí, oeste de Alagoas e Sergipe, região norte e central da Bahia e uma faixa de Minas Gerais. As espécies vegetais da caatinga são predominantemente xerófilas e decíduas, como mecanismos de adaptação ao déficit hídrico prolongado, que é bastante comum na região.

O clima da região semiárida pode ser caracterizado pela ocorrência de elementos meteorológicos extremos, com altos valores de temperatura do ar e de radiação, umidade relativa e volumes pluviométricos baixos que culminam em elevada demanda atmosférica, com evaporação atingindo em média 2.000 mm ano<sup>-1</sup> (IICA, 2002). Essas condições podem tornar-se ainda mais estressantes em decorrência de 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.

Em ambas as situações, podem ser constatadas alterações na atuação da Zona de Convergência Intertropical, principal sistema responsável pela qualidade e quantidade da precipitação durante o período chuvoso, principalmente no norte do Nordeste. No primeiro caso, o aquecimento anormal das águas do Pacífico leste promove um enfraquecimento dos ventos alísios e uma modificação da Circulação Geral da Atmosfera na América do Sul. No segundo, por outro lado, é observada a "diferença entre a anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na Bacia do Oceano Atlântico Norte e Oceano Atlântico Sul" (FERREIRA; MELO, 2005) e, em ambos os casos, alterações nas características dos demais elementos da atmosfera.

De um modo geral, o clima, mais especificamente 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; ZHANG et al., 2010; SOUZA 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 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 visto que desempenham importante papel no clima e na biologia regional (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), de estimativa de biomassa (ABRAHA; SAVAGE, 2008), sequestro de carbono (KATO et al., 2004; WANG et al., 2010; YUAN et al., 2007), 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.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Localização e caracterização da área experimental**

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

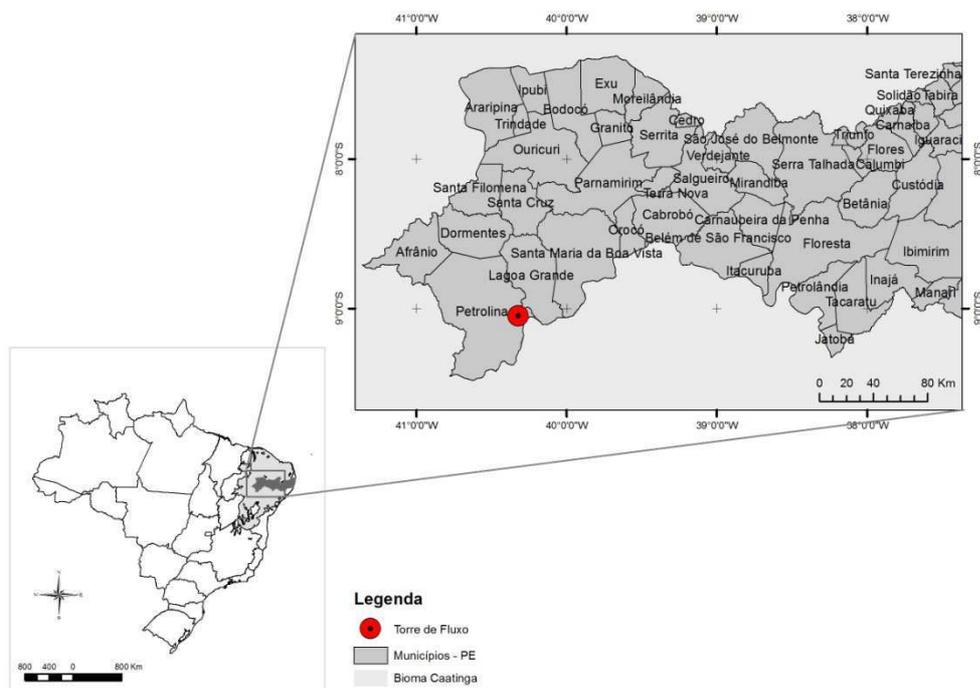


Figura 1 - Localização geográfica da torre micrometeorológica para o monitoramento dos fluxos de energia, vapor d'água e massa em uma área de Caatinga preservada, Petrolina-PE.

O clima da região, segundo Köpen, é classificado como BSw<sup>h</sup>, 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 destacam com maior frequência relativa: *Poincianella microphylla* (Caatingueira falsa), *Croton conduplicatus* (quebra faca), *Manihot pseudoglaziovii* (maniçoba) e *Commiphora leptophloeos* (Imburana do cambão).

## 2.2. 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 15,7m 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.

### 2.3. 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  $\alpha$  = albedo.

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

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:

$$\text{BOL} = Q_a - Q_s \quad (4)$$

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

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.

#### **2.4. 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 ( $f\text{RFA}_a$ ) foi realizada com base na metodologia proposta por Gower et al. (1999), por meio da equação 5:

$$f\text{RFA}_a = \frac{[(\text{RFA}_T - \text{RFA}_R) - (\text{RFA}_B - \text{RFA}_{RO})]}{\text{RFA}_T} \quad (5)$$

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:

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

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Variáveis ambientais

O ano de 2012 foi marcado pela ocorrência um volume pluviométrico baixo, apresentando um total acumulado de  $92,2 \text{ mm ano}^{-1}$ , que foi muito inferior a normal climatológica da região ( $510 \text{ mm anuais}$ ) (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, 2014). 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  $23,15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  ( $20,15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), temperatura do ar média, máxima e mínima iguais a  $26,9^\circ\text{C}$  ( $26,2^\circ\text{C}$ ),  $33,8^\circ\text{C}$  ( $31,8^\circ\text{C}$ ) e  $21,5^\circ\text{C}$  ( $21,5^\circ\text{C}$ ) e umidade relativa média bastante reduzida, com valor médio igual a  $48,8\%$  ( $58\%$ ). Todos estes elementos associados a velocidade do vento média anual relativamente alta ( $4,56 \text{ m s}^{-1}$ ) resultaram em demanda atmosférica elevada, com valores de déficit de pressão de vapor médios em torno de  $2,5 \text{ kPa}$ .

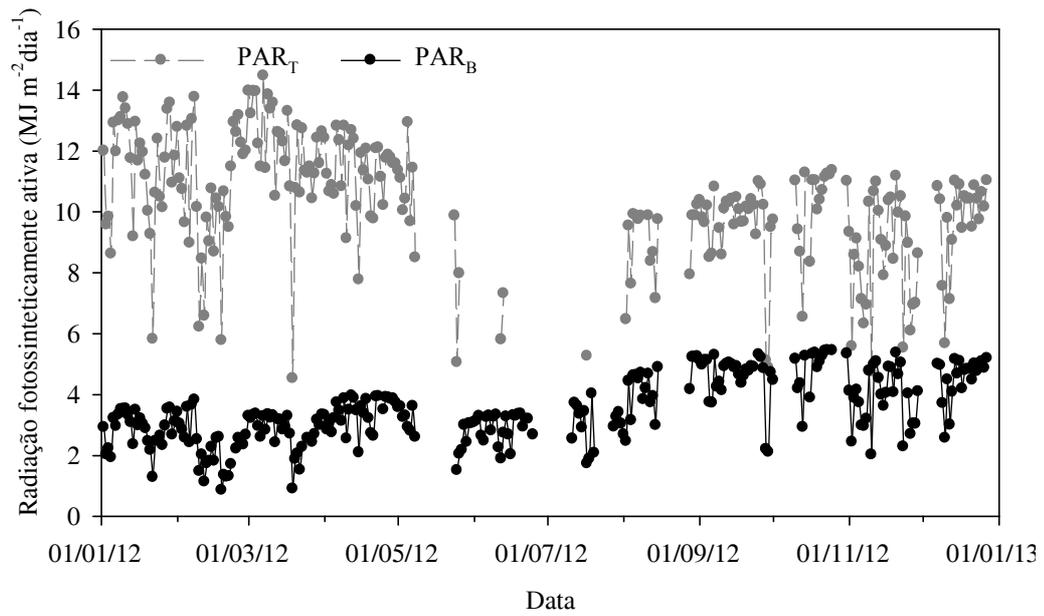
#### 3.2. Interação entre a vegetação e a radiação fotossinteticamente ativa

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

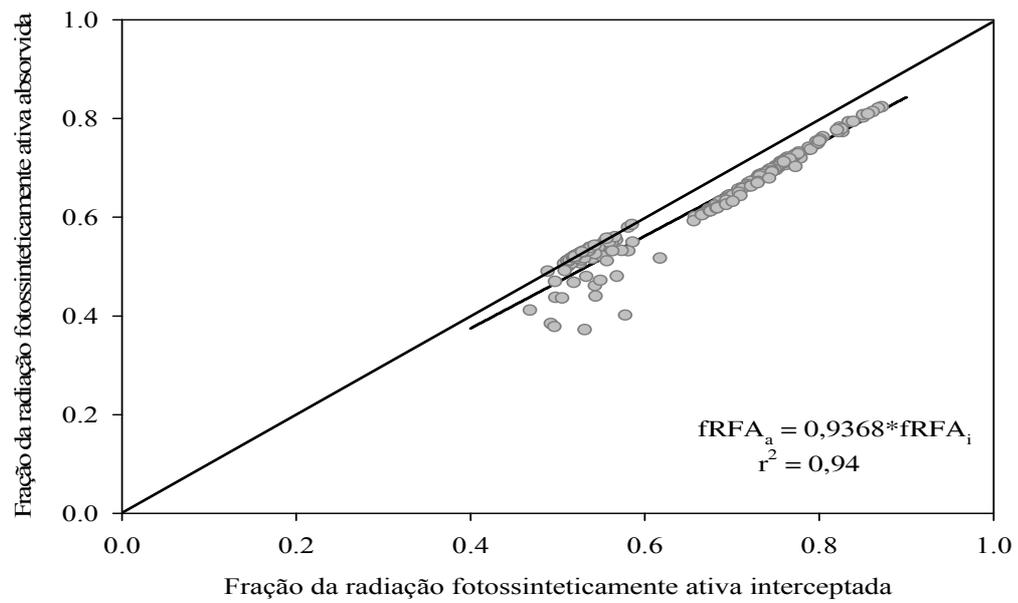
volumes pluviométricos associados às condições estressoras da atmosfera resultou na abscisão foliar antecipada, e conseqüentemente, uma diminuição do fator de cobertura do solo. Nesse caso, o ano iniciou com valores elevados de cobertura do solo, em torno de 75% (quando o índice de área foliar - IAF 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 2. 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  $9,25 \pm 1,33 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , sendo verificados dias com mínimo de  $5,26 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Figura 2a). 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. Nascimento et al. (2012), analisando a razão RFA/Qg durante o ano de 2010 na região do Submédio Vale do São Francisco, encontraram valores de 40% e 36% para o primeiro e segundo semestre respectivamente. Concordantes com os resultados apresentados por Moura et al. (2011) que observaram RFA/Qg igual a 40% para a mesma região.



(a)



(b)

Figura 2 - 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.

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 2a) 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,  $\text{RFA}_B$  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 durante o primeiro semestre apresentaram valores muito próximos, com máximos, médios e mínimos da ordem de 0,87; 0,64 e 0,46 e 0,82; 0,69 e 0,51 para a  $\text{fRFA}_i$  e  $\text{fRFA}_a$ , respectivamente. Sendo verificada uma relação linear direta com um coeficiente angular de 0,94 (Figura 1b). Portanto, 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 a caatinga essas variações apenas foram relatadas para o primeiro semestre do ano, onde as variações estiveram em torno de 7% (SILVA et al., 2013). Para culturas agrícolas Müller e Bergamaschi (2005) encontraram valores em torno de 7,6% para o milho; já Randin (2003) cita diferenças em torno de 10% para o tomateiro.

### **3.3. Variação sazonal dos componentes do balanço de radiação**

O comportamento dos componentes do balanço de radiação durante o período estudado é apresentado na Figura 3. 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. 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. 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. (TEIXEIRA, 2013).

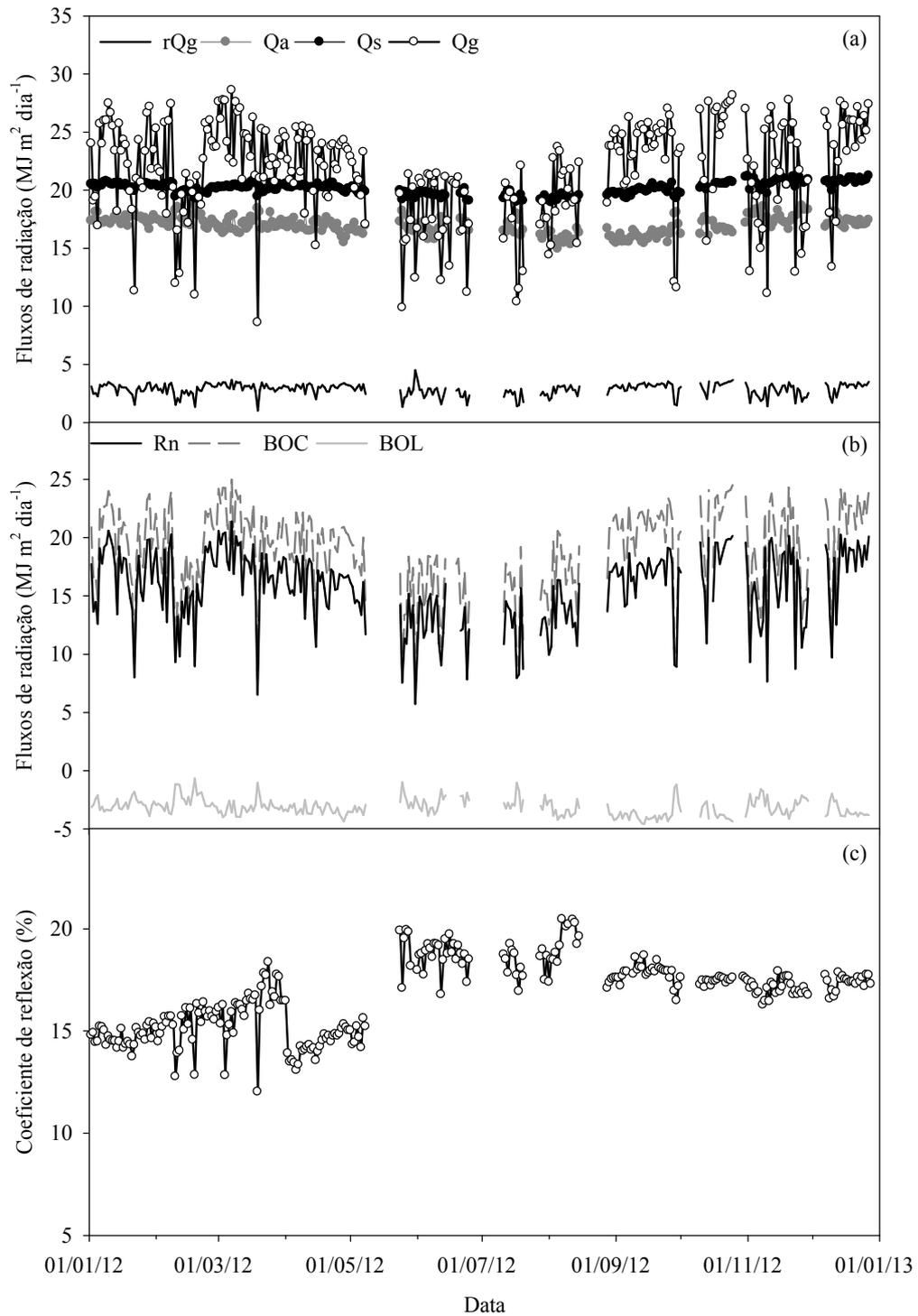


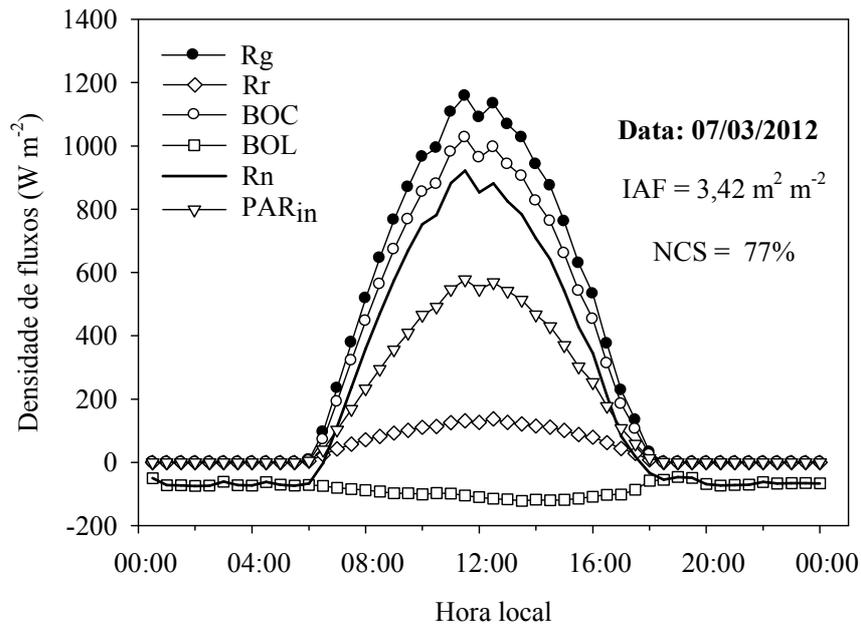
Figura 3 - Comportamento sazonal médio dos componentes do balanço de radiação (a): radiação solar refletida ( $Q_r$ ), radiação solar global ( $Q_g$ ), radiação de ondas longas emitida pela atmosfera ( $Q_a$ ), radiação de ondas longas emitida pela superfície ( $Q_s$ ), saldo de radiação ( $R_n$ ), balanço 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

Quando analisada a Figura 3a 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  $36^\circ\text{C}$ , ocasionando uma tendência de aumento da  $Q_s$ . Este incremento por sua vez se traduziu em uma redução nos valores de BOL (Figura 3b). Resultados semelhantes foram observados por Moura et al. (2002) em estudo para analisar o balanço de energia sobre um pomar de goiabeira na região do Submédio Vale do São Francisco e por Silva et al. (2012) em um canavial nessa mesma região.

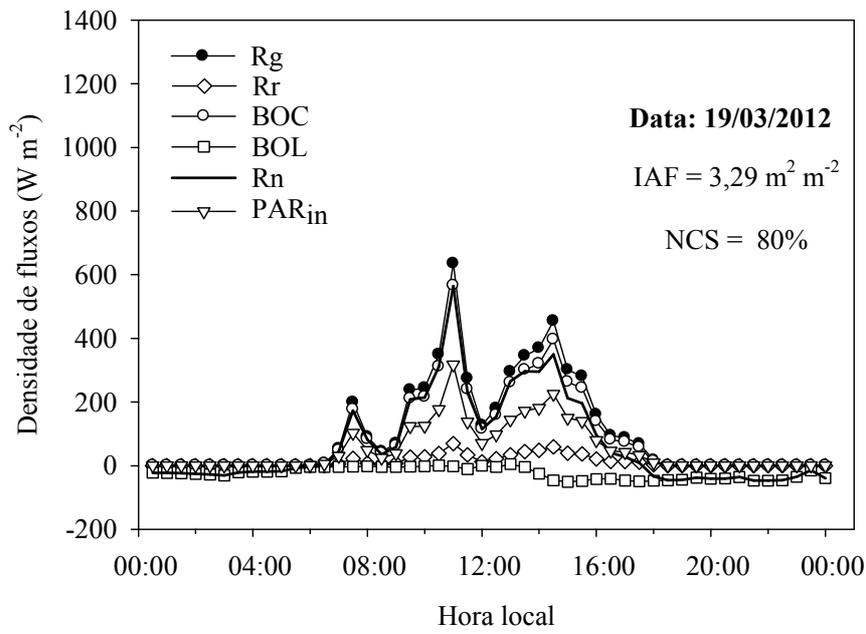
Analisando-se a relação entre as radiações refletida e incidente, ou seja, o coeficiente de reflexão para a área de caatinga preservada durante o ano de 2012 observa-se que os menores valores ( $14 \pm 2\%$ ) foram constatados no início do período, quando o nível de cobertura do solo era alto, em torno de 75% e, portanto, havia menor exposição da superfície do solo. Em seguida, constatou-se o aumento do albedo, que alcançou 20% no mês agosto com valor médio anual de  $17 \pm 1,6\%$ . Esses resultados estão próximos aos observados por Lima et al. (2009) que, analisando o comportamento do albedo para a caatinga durante o período de janeiro a maio, observaram o valor de albedo de 15%. 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%. A diferença 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.

### **3.4. Variação horária dos componentes do balanço de radiação**

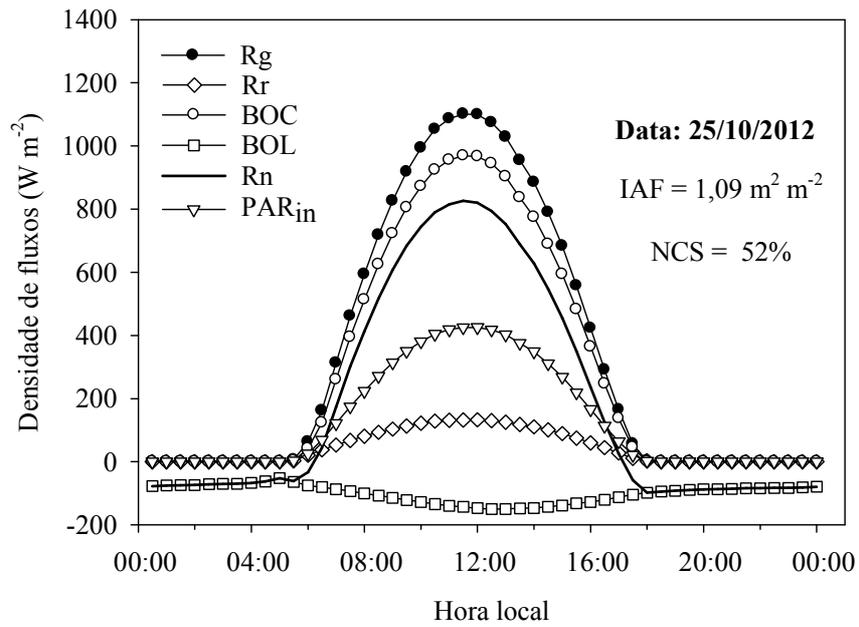
Para análise horária dos componentes do balanço de radiação foram selecionados quatro dias com condições semelhantes, todavia com níveis de cobertura do solo distintos: 07/03/2012, 19/03/2012, 25/10/2012 e 10/11/2012. Observa-se que a radiação solar global ( $Q_g$ ), no horário de 11h30 às 13h30, apresentou valores iguais a  $1.112 \pm 40 \text{ W m}^{-2}$ , para o dia 07/03/2012 (Figura 4a), que mostrou-se pouco superior ao observado no dia 25/10/2012 ( $1.050 \pm 20 \text{ W m}^{-2}$ ) (Figura 4c), e em ambos os dias pode-se constatar um baixo desvio padrão, que caracteriza condições de céu claro.



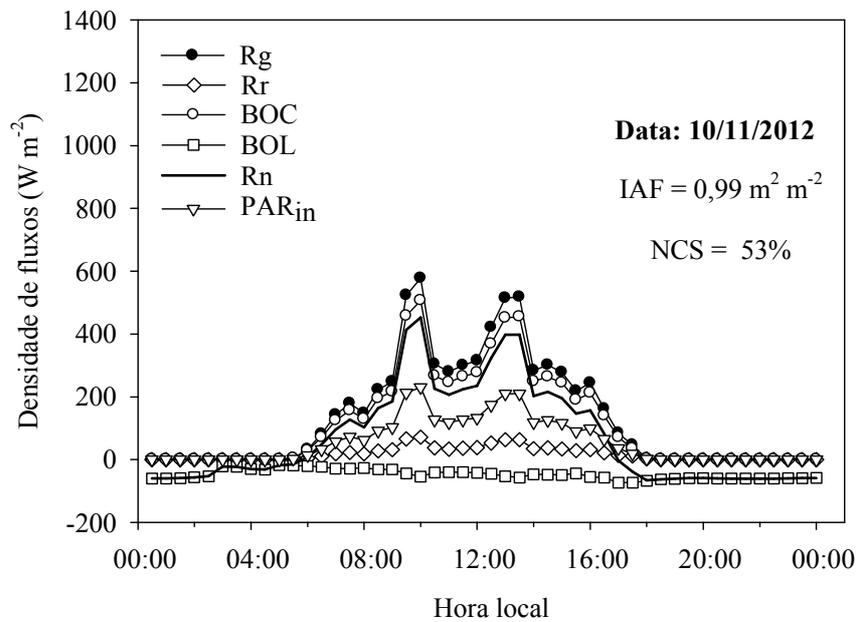
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4 - Variação horária dos componentes do balanço de radiação em dias de céu claro (a e c) e nublados (b e d), com nível de cobertura vegetal alto (a e b) e baixos (c e d), durante o ano de 2012, Petrolina-PE.

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 conseqüentemente do balanço de ondas longas ( $\text{BOL} = -113,5 \text{ W m}^{-2}$ ) quando comparado ao dia 25/10/2012 ( $\text{BOL} = -147,6 \text{ W m}^{-2}$ ), 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  $870 \text{ W m}^{-2}$  e  $798 \text{ W m}^{-2}$ , 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  $1.200 \text{ W m}^{-2}$ .

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  $900 \text{ W m}^{-2}$  para o mesmo intervalo e mês.

Em dias nublados (Figuras 4b e 4d) 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.

#### 4. 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.

## 5. REFERÊNCIAS

ABRAHA, M. G.; SAVAGE, M. J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 03, p. 401-416, 2008.

BALDOCHI, D. D.; VALENTINI, R.; RUNNING, S.; OECHELS, W.; DAHLMAN, R. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. **Global Change Biology**. v. 2, p. 159-168, 1996.

CUNHA, A. P. M. do. A.; ALVALÁ, R. C. dos. S.; OLIVEIRA, G. S. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, 139 - 152, 2013.

CPTEC. **Centro de Previsões de tempo e Estudos Climáticos**. <http://www.cptec.inpe.br> (accessado em: 03.09.2014)

EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido. Médias anuais da Estação Agrometeorológica de Bebedouro. Petrolina, 2013. Disponível em: <<http://www.cpatsa.embrapa.br:8080/servicos/dadosmet/ceb-anual.html>>. Acesso em: 17 08. 2014.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. da. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

GIAMBELLUCA, T. W., SCHOLZ, F. G., BUCCI, S. J., MEINZER, F. C., GOLDSTEIN, G., HOFFMANN, W. A., FRANCO, A. C., BUCHERT, M. P. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1365-1376, 2009.

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**. v. 70, p. 29-51, 1999.

KATO, T.; TANG, Y.; GUB, S.; CUI, X.; HIROTA, M.; DU, M.; LI, Y.; ZHAO, X.; OIKAWA, T. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, p. 121-134, 2004.

LIMA, P.C.S.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; AZEVEDO, P.V.; OLIVEIRA, G.M.; SOBRINHO, J.E.; MOURA, M.S.B.; MENEZES, H.E.A.; PINTO, M.G.C.L. Albedo de pastagem e caatinga. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Belo Horizonte – MG, 2009.

MOURA, M. S. B. ; CARMO, J. F. A. ; SÁ, I. I. S.; LEO, P. C. S. ; SILVA, T. G. F. da ; SOUZA, L. S. B. de . Photosynthetically active radiation levels in a Syrah vineyard in a Brazillian Tropical Semiarid area: preliminary results. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE GROUP OF INTERNATIONAL EXPERTS OF VITIVINICULTURAL SYSTEMS FOR COOPERATION, 17, 2011, Asti, IT. Proceedings.... Le Progrès Agricole et Viticole. Asti: **GIESCO**, 2011.

MOURA, M. S. B.; SILVA, B. B.; AZEVEDO, P. V.; SOARES, J. M. Balanço de radiação sobre um pomar de goiabeiras. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, **Anais**, Foz do Iguaçu, 2002.

MÜLLER. A. G.; BERGAMASCHI, H. 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**, v. 13, n. 1, p. 27-33, 2005.

NASCIMENTO, J. F. ; MOURA, M. S. B. ; SOUZA, L. S. B. ; CARMO, J. F. A. ; RODRIGUES, G. D. S. ; LEO, P. C. S. . Análise da radiação fotossinteticamente ativa em um vinhedo durante duas épocas produtivas no Submédio do Vale São Francisco: resultados preliminares.. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17.; ENCONTRO DE METEOROLOGIA DOS PAÍSES DO MERCOSUL E ASSOCIADOS, 1.; ENCONTRO SUL AMERICANO DE APLICAÇÕES DO SISTEMA EUMETCast PARA O MONITORAMENTO METEOROLÓGICO E AMBIENTAL, 4.; ENCONTRO DE METEOROLOGIA OPERACIONAL, 2012, Gramado. **Anais...Incertezas e desafios para a sustentabilidade planetária: o papel da ciência meteorológica**. Gramado: UFRGS, 2012. v. Cd Rom.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, 166-174, 2006.

PAIVA, C. M. **Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR**. 2005. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; JUNIOR, C.R.; BARNI, N.A.; MATZENAUER, R.; DIDONÉ, I.A. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 38 n. 9 Brasília, 2003.

SANTOS, S. A.; CORREIA, M. F.; ARAGÃO, M. R. S.; OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, E. P. Análise das trocas de água, energia e CO<sub>2</sub> em área de Caatinga: período úmido. **Ciência e Natura**. v. Especial, p 147-150, 2011.

SANTOS, S. de. A.; CORREIA, M. de. F.; ARAGÃO, M. R. da. S.; SILVA, P. K. de. O. Aspectos da variabilidade sazonal da radiação, fluxos de energia e CO<sub>2</sub> em área de Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 4, p. 761-773, 2012.

SILVA, B. B. da.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; GALVINCIO, J. D.; OLIVEIRA, L. M. M. de. Determinação de fluxos radiativos em áreas heterogêneas no estado de São Paulo com imagens TM – Landsat 5. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

SILVA, T. G. F. da ; MOURA, M. S. B. ; ZOLNIER, S. ; SOARES, J. M. ; SOUZA, L. S. B. de ; BRANDÃO, E. O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)**, v. 15, p. 139-147, 2011.

SILVA, T. G. F. ; ZOLNIER, S. ; MOURA, M. S. B. ; SOUZA, L. S. B. . Sazonalidade do Controle de Evapotranspiração pela Cana-de-Açúcar Irrigada e Características Aerodinâmicas da Cultura no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 621-634, 2013.

SOUZA, P. J. de O. P. de.; ROCHA, E. J. P. da.; RIBEIRO, A.; SOUZA, E. B. de. Radiation balance in a soybean ecosystem in the Amazon. **Revista Ciência Agronômica**. v. 41, n. 4, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, N. D.; MOURA, M. S. B. DE; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, p. 110-127, 2008.

TEIXEIRA, A. H. DE C. ; SCHERER-WARREN, M. ; LOPES, H. L. ; HERNANDEZ, F. B. T. ; ANDRADE, R. G. ; Neale, C.M.U. . Application of MODIS images for modelling the energy balance components in the semi-arid conditions of Brazil. Proceedings of SPIE - **International Society for Optical Engineering**, v. 8887, p. 888719-1-888719-11, 2013.

WANG, H.; JIA, G.; FU, C.; FENG, J.; ZHAO, T.; MA, Z. Deriving maximal light use efficiency from coordinated flux measurements and satellite data for regional gross primary production modeling. **Remote Sensing of Environment**. v. 114, p. 2248-2258, 2010.

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. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 1416–1431, 2010.

ZHANG , X.; GU, S.; ZHAO, X.; CUI, X.; ZHAO, L.; XU, S.; DU, M.; JIANG, S.; GAO, Y.; MA, C.; TANG, Y. Radiation partitioning and its relation to environmental factors above a meadow ecosystem on the Qinghai Tibetan Plateau. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, D. 10106, 2010.

## CAPÍTULO 2

### BALANÇO DE ENERGIA E CONTROLE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UM ECOSISTEMA DE CAATINGA DURANTE UM ANO SECO NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

**RESUMO:** Este trabalho objetivou analisar a variação sazonal dos componentes do balanço de energia e o controle da evapotranspiração em uma área de Caatinga durante um ano seco em Petrolina-PE. O experimento foi conduzido durante o ano de 2012 em Petrolina, PE, localizado na região do Semiárido brasileiro, com a utilização do sistema de *Covariância dos vórtices turbulentos* (CVT). As medições do fluxo de calor sensível e latente foram realizadas à 16,9 metros acima da superfície do solo por meio de um anemômetro sônico tridimensional (para medir as flutuações médias da velocidade de vento ( $u$ ,  $v$ , e  $w$ ) e temperatura), e um analisador infravermelho de gases em circuito aberto (para medidas do vapor d'água), ambos operando a uma frequência de 16 Hz. Adicionalmente foram realizadas medidas dos elementos meteorológicos: temperatura e umidade do ar, radiação solar global, saldo de radiação, fluxo de calor e temperatura do solo. Os dados dos fluxos de calor sensível e latente foram processados com auxílio do programa Alteddy e analisados em escalas diária e sazonal. Com os dados do fluxo de calor latente, a foi determinada a evapotranspiração, bem como indicadores que permitem inferir sobre a sua sensibilidade as condições ambientais: fator de desacoplamento ( $\Omega$ ), resistência aerodinâmica ( $r_a$ ) e da superfície ( $r_s$ ). Observou-se que o saldo de radiação apresentou forte sazonalidade com comportamento dependente da radiação solar, sendo a partição dos componentes do balanço de energia destinada ao fluxo de calor sensível foi maximizada pela ocorrência da seca prolongada. Neste caso, a evapotranspiração sob condições de seca intensa foi especialmente dependente do déficit de pressão de vapor e do controle da superfície.

**Palavras-chave:** Covariância dos vórtices turbulentos, seca, fluxos de calor latente, sensível, fator de desacoplamento.

**ABSTRACT:** The aim of this study was to analyze the seasonal variation of the components of energy balance and control of evapotranspiration in an area of caatinga preserved during a dry year in Petrolina. The experiment was conducted during the year 2012 in Petrolina, PE, located in the Brazilian semi-arid region using the eddy covariance (EC) system. The measurements of the flow of sensible heat and latent were performed at 16 meters above the ground surface by means of a three-dimensional ultrasonic anemometer to measure the average wind speed fluctuations ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) and temperature ( $t$ ). Temperature, humidity, radiation, net radiation, soil heat flux and temperature: infrared gas analyzer in an open circuit for measurements of water vapor, both operating at a frequency of 16 hz additionally measurements of meteorological elements were made soil. Data flows of sensible heat and latent were processed with the aid of alteddy and analyzed on daily and seasonal scales. Decoupling factor ( $\Omega$ ), aerodynamic resistance ( $r_a$ ) and surface ( $r_s$ ): the data in the latent heat flux, evapotranspiration and indicators that allow us to infer their sensitivity to environmental conditions was determined. Based on the results it was observed that the net radiation showed a strong seasonality with dependent behavior of solar radiation, with the partition of the components of the balance of energy for sensible heat flux was maximized by the occurrence of prolonged drought. In this case, evaporation under

severe drought conditions was specifically dependent on the vapor pressure and surface control showed a very strong coupling of vegetation atmosphere deficit.

**Keywords:** Covariance of turbulent vortices, dry, latent heat flux, sensible, decoupling factor.

## 1. 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; YAKIR, 2010; KRISHNAN et al., 2012). Esse percentual pode ser alterado em decorrência das mudanças no regime de precipitação no globo terrestre, possíveis aumentos da temperatura e déficit hídrico associado às projeções das mudanças climáticas globais que têm sugerido o provável aumento das áreas áridas e semiáridas no mundo, acarretando alterações na interação entre a superfície e a atmosfera em escalas local, regional e global (IPCC, 2014; SEAGER et al., 2007). Nessas regiões as condições climáticas estressoras quando associadas à substituição da vegetação nativa por áreas desmatadas ou pela implantação de cultivos agrícola, as tem colocado como uma das mais vulneráveis às mudanças climáticas (IPCC, 2014).

O Bioma Caatinga recobre a região do Semiárido brasileiro, com extensão territorial de aproximadamente 844.000 km<sup>2</sup>, compreendendo cerca de 80% do Nordeste brasileiro e 11% do território Nacional (SANTOS et al., 2012). Sua vegetação caracteriza-se por apresentar grande diversidade de espécies arbóreas e arbustivas, quase sempre decíduas ou xerófilas, com respostas diferenciadas às condições do ambiente (SANTOS et al., 2011; SANTOS et al., 2012). O regime pluvial da região é bastante sazonal, com cerca de quatro meses chuvosos e um longo período sem chuvas. Nos meses secos a demanda atmosférica torna-se substancialmente elevada, induzindo a ocorrência de estresse hídrico nas espécies, que pode ser potencialmente agravado em decorrência de mudanças nos padrões atmosféricos de larga escala, como observado no ano de 2012 quando a ocorrência do fenômeno Dipolo do Atlântico culminou em alterações no regime pluviométrico da região, e conseqüentemente na intensidade da seca (CEARÁ, 2013).

Uma das maneiras de compreender as respostas do ecossistema é por meio do balanço de energia representado pelas suas partições no fluxo de calor latente (LE),

sensível (H) e de calor no solo (G) (KRISHNAN et al., 2012; CHEN et al., 2009). O primeiro componente contempla a energia disponível para o processo de evapotranspiração, enquanto que os demais representam a energia disponível para os processos de trocas de calor do ar e do solo, respectivamente. Em superfícies Semiáridas tem sido observado que maior parte da energia disponível é utilizada no aquecimento do ar e solo em decorrência da baixa disponibilidade hídrica (CHEN et al., 2009; TEIXEIRA et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2006). Para a Caatinga estudos têm demonstrado que em anos onde a precipitação se aproxima da normal climatológica essa partição é aproximadamente da ordem de 63%, 24,7% e 0,2% para o H, LE e G, respectivamente. Todavia, essa pode ser alterada em decorrência de alterações no regime de precipitação (TEIXEIRA et al., 2008).

Dentre os componentes do balanço de energia a transferência do vapor d'água para a atmosfera é um dos que apresentam maior importância, sendo influenciado pelas condições climáticas e características da superfície (BALDOCCHI et al., 2004; SILVA et al., 2012), que se manifestam por meio da resistência da superfície ( $r_s$ ) e aerodinâmica ( $r_a$ ). Para analisar a habilidade da superfície no processo de transferência de vapor d'água tem-se utilizado o fator de desacoplamento ( $\Omega$ ) (MARIN & ANGELOCCI, 2011; PEREIRA, 2004; SILVA et al., 2012). Este indicador foi proposto por McMaughon e Jarvis (1983) e seus valores podem oscilar entre zero e um. Quanto mais próximo de zero significa que maior é a dependência da ET em relação à condutância da superfície e ao déficit de pressão de vapor, ou seja, mais efetivo o controle da vegetação no processo e maior seu acoplamento com a atmosfera. Por outro lado, quanto mais próximo de 1 maior a dependência da radiação. Esses dois valores (0 e 1) normalmente são representativos de situações extremas, sendo observados em condições naturais valores intermediários, que dependem da característica da superfície, tipo da vegetação, estádios de desenvolvimento da espécie e disponibilidade hídrica (SILVA et al., 2012; DAMATTA; RAMALHO, 2006; GOLDBERG; BERNHOFER, 2008).

Estudos dessa natureza não foram aplicados a Caatinga e são importantes por permitir a análise mais realística e detalhada da interação do ecossistema com a atmosfera, podendo ser importantes para uma melhor compreensão das respostas desta vegetação às mudanças no regime de precipitação, e mesmo servir como parâmetros de entrada em modelos de simulação climática. Assim, objetivou-se com esse trabalho analisar a variação sazonal dos componentes do balanço de energia e o controle da

evapotranspiração em uma área de Caatinga preservada durante um ano seco em Petrolina-PE.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado em uma área com caatinga preservada localizada na área da Embrapa Semiárido (9°05'S; 40°19' W; 350m), município de Petrolina, PE. O clima da região, segundo Köpen, é classificado como BSw<sup>h</sup>, 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. O local de estudo apresenta relevo plano e área total de aproximadamente 600 ha, composta por uma vegetação hiperxerófila de porte arbóreo-arbustivo (com altura média de aproximadamente 5 metros). Dentre as quais se destacam pela frequência relativa as espécies: *Poincianella microphylla*, *Croton conduplicatus*, *Bauhinia cheilantha*, *Manihot pseudoglaziovii*, e *Commiphora leptophloeos*.

### 2.2. Medições micrometeorológicas

Os aspectos micrometeorológicos foram caracterizados para o ano de 2012 por meio do sistema de *Covariância dos vórtices turbulentos* (CVT). Para isso, buscou-se garantir uma distância de *fetch* (bordadura) suficientemente grande em todas as direções (com pelo menos 300 m), especialmente na direção do vento predominante para minimizar possíveis erros de medição. A área do *footprint* foi calculada utilizando-se o modelo de Hsieh et al. (2000), que se baseia na dispersão estocástica Lagrangiana estocástica a partir de  $x/L$  (parâmetro de estabilidade de Monin-Obhukov). Constatando-se que a contribuição da direção do vento predominante na maioria do período ocorreu nas proximidades da torre (entre 120 e 200 m), e foi proveniente de sudeste. Assim, os sensores foram fisicamente orientados na direção do vento médio vertical ao lado da torre para minimizar o potencial na distorção do fluxo.

As medições do fluxo de calor sensível e latente foram realizadas a 16,9 metros acima da superfície do solo por meio de um anemômetro sônico tridimensional (CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, E.U.A.) para medir as flutuações médias da

velocidade de vento ( $u$ ,  $v$ , e  $w$ ) e temperatura e um analisador de gases ao infravermelho em circuito aberto, (LI-7500, LI-COR, Inc. Lincoln, NE, E.U.A.) para medidas do vapor d'água, ambos operando a uma frequência de 16 Hz.

Adicionalmente realizaram-se medidas dos elementos meteorológicos, por meio de sensores cuja descrição encontra-se na Tabela 1. Todos os dados foram armazenados em um sistema de aquisição de dados (modelo CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) programado para realizar medidas a cada 60 segundos com médias em intervalos de 10 minutos.

### **2.3. Processamento e análise dos dados**

Os fluxos de calor sensível ( $H$ ) e latente ( $LE$ ) foram calculados utilizando o método da covariância dos vórtices turbulentos, segundo o qual os fluxos são proporcionais à covariância entre as flutuações da componente vertical da velocidade do vento e flutuações na temperatura do ar e concentrações de vapor d'água, conforme descrito por Baldocchi et al. (1988). Esses dados foram utilizados no cálculo das médias de 30 minutos por meio do *software* Alteddy, versão 3.6 (Alterra, University of Wageningen, The Netherlands).

Os passos para o processamento dos dados brutos incluíram: a rotação tridimensional das coordenadas, correção da flutuação da densidade do ar e da umidade do ar. No primeiro caso, buscou-se atenuar o efeito do vento lateral na velocidade sônica, na temperatura e no vapor d'água (McMILLEN, 1998). Os efeitos da flutuação da densidade do ar foram corrigidos utilizando-se a metodologia de Webb et al. (1980), enquanto a influência da umidade do ar no fluxo de calor sensível foi corrigida por meio da proposição de *Schotanus/Liu* (SCHOTANUS et al., 1983). Além disso, realizaram-se testes básicos para analisar as condições de estabilidade da atmosfera, sendo aplicados filtros na velocidade de fricção ( $u^* < 0,5 \text{ m s}^{-1}$ ) para evitar condições de advecção e baixa turbulência (FOKEN et al., 2004). Após esse procedimento, constatou-se que cerca de 80% dos dados apresentaram consistência para utilização nas análises subsequentes.

Tabela 1 - Sensores meteorológicos, modelos, fabricantes e altura de instalação em relação ao solo, utilizados no monitoramento micrometeorológico de uma área de Caatinga preservada durante o ano de 2012, Petrolina-PE

<b>Parâmetro</b>	<b>Quant.</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Modelo/Fabricante/Local</b>	<b>Descrição das medidas</b>	<b>Altura do sensor (m)</b>
$Q_g$	1	Piranômetro	CM3 Kipp & Zonen, Delft, Netherlands	Radiação solar global incidente	13,3
$Q_r$	1	Piranômetro	CM3 Kipp & Zonen, Delft, Netherlands	Radiação solar global refletida	13,3
$ROL_i$	1	Pirgeômetro	CG3 Kipp & Zonen, Delft, Netherlands	Radiação de ondas longas incidente	13,3
$ROL_e$	1	Pirgeômetro	CG3 Kipp & Zonen, Delft, Netherlands	Radiação de ondas longas emitida	13,3
$R_n$	1	Saldo radiômetro	CNR1 Net radiometer – Kipp Zonen B.V., Delft, Netherlands	Saldo de radiação	13,3
$T_{ar}$ e $UR_{ar}$	1	Termistor e Capacitor	HMP45C-L, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA	Temperatura e umidade relativa do ar	15,7
P	1	Pluviômetro	CS700-L Hydrological Services Rain Gage, Liverpool, Australia	Precipitação pluvial	16,3
$V_v$	1	Anemômetro		Velocidade do vento	16,9
Medidas da velocidade do vento 3D, $H_2O$ e concentração de $CO_2$	1	Sistema de Covariância dos vórtices turbulentos	CSAT3, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, EUA + LI7500, LI-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, EUA	Fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente, fluxo de $CO_2$	16,9
G	2	Placas de termopilhas	HFT3-REBS, Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah, USA	Fluxo de calor no solo	0,05
$t_{solo}$	2	Termistor		Temperatura do solo	0,02 e 0,10

Os dados faltantes foram preenchidos utilizando-se a ferramenta *online* proposta pela rede FLUXNET (<http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc>) que considera a manutenção da variação média diurna das variáveis e métodos semi-empíricos que preservam as respostas dos fluxos às condições onde as falhas são preenchidas, semelhante ao reportado por Falge et al. (2001). Adicionalmente, considera a covariância entre os fluxos e as variáveis meteorológicas (REICHSTEIN et al., 2005) de modo que os dados faltante foram preenchidos por um valor médio em condições meteorológicas semelhantes dentro de um intervalo de tempo.

#### 2.4. Componentes do balanço de energia

O particionamento do balanço de energia (Rn), representado pelos fluxos de calor sensível (H) e pelo fluxo de calor latente (LE) foi obtido por meio da técnica de *Covariância dos vórtices turbulentos*, com base nas seguintes equações:

$$Rn - H - LE - G = 0 \quad (1)$$

$$H = \rho_a c_p \overline{w'T'} \quad (2)$$

$$LE = L \overline{w'q'} \quad (3)$$

em que Rn é saldo de radiação ( $W m^{-2}$ ), H é fluxo de calor sensível ( $W m^{-2}$ ), LE é fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ), e G é fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ),  $w'$  é variação da velocidade vertical do vento, L é calor latente de vaporização,  $\rho_a$  é densidade do ar,  $c_p$  é calor específico do ar, T é temperatura do ar, q é umidade específica.

#### 2.5. Parâmetros do dossel da vegetação

Para melhor compreensão da variação sazonal dos fluxos de energia e dos fatores que controlam a evapotranspiração foram calculados alguns parâmetros em nível de dossel: a resistência do dossel ( $r_s$ ) e o fator de desacoplamento (MCNAUGHTON; JARVIS, 1983). O primeiro ( $r_s$ ) é um indicativo da influência da superfície na perda de calor latente, e foi obtida por meio da reorganização da equação de Penman-Montheith (MONTHEITH; UNSWORTH, 1990).

$$r_s = \frac{\rho_a c_p VDP}{\gamma LE} - r_a \frac{1 - \Delta H}{\gamma LE} \quad (4)$$

em que,  $r_s$  é a resistência da superfície ( $s\ m^{-1}$ ),  $\rho_a$  a massa específica do ar ( $kg\ m^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar úmido à pressão constante ( $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ),  $VPD$  é o déficit de pressão de vapor (kPa),  $LE$  é o calor latente de evaporação ( $W\ m^{-2}$ ),  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de saturação ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ),  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico ( $Pa\ K^{-1}$ ).

O fator de desacoplamento ( $\Omega$ ) por outro lado, foi determinado por meio da metodologia proposta por McNaughton e Jarvis (1983), com base na equação 5:

$$\Omega = \left( 1 + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} \frac{r_s}{r_a} \right)^{-1} \quad (5)$$

em que  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico,  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água ( $k\ Pa\ ^\circ C^{-1}$ ),  $r_s$  e  $r_a$  representam a resistência da superfície e aerodinâmica ( $s\ m^{-1}$ ), respectivamente.

Para a determinação da resistência aerodinâmica foram consideradas condições de atmosfera não neutra, incluindo-se os parâmetros de correção da estabilidade atmosférica, conforme Equação 6 (CAMPBELL; NORMAN, 1998):

$$r_a = \frac{\left[ \ln \left( \frac{z_m - d}{z_{om}} \right) - \psi_m \right] \left[ \ln \left( \frac{z_h - d}{z_{oh}} \right) - \psi_h \right]}{k^2 \cdot U_z} \quad (6)$$

em que  $r_a$  é a resistência aerodinâmica ( $s\ m^{-1}$ ),  $z_m$  é a altura da medida da velocidade do vento (m),  $d$  é o deslocamento do plano zero (m),  $z_{om}$  o comprimento da rugosidade que governa a transferência de momentum (m),  $\psi_m$  é o fator de correção de estabilidade para o fluxo de momentum,  $z_h$  a altura da medida de umidade (m),  $z_{oh}$  o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e vapor (m),  $\psi_h$  é o fator de correção da estabilidade para o fluxo de calor,  $k$  a constante de von Karman ( $k=0,41$ ),  $u_z$  é a velocidade do vento no nível  $z$  (m). Para os parâmetros  $z_{om}$  e  $z_{oh}$  utilizaram-se as relações com a altura média da vegetação, ao passo que as correções dos parâmetros

relacionados às correções de estabilidade atmosférica foram obtidos de acordo com Arya (2001):

$$\psi_m = \psi_h = -5 \frac{z}{L}, \text{ para } \frac{z}{L} \geq 0$$

$$\psi_m = \ln \left[ \left( \frac{1+x^2}{2} \right) \left( \frac{1+x}{2} \right)^2 \right] - 2 \tan^{-1} x + \frac{\pi}{2}, \text{ para } \frac{z}{L} \leq 0$$

$$\psi_h = 2 \ln \left( \frac{1+x^2}{2} \right), \text{ para } \frac{z}{L} \leq 0$$

Nas quais  $x = (1-15Z/L)^{1/4}$ ,  $L$  é o comprimento de rugosidade de Monin-Obukov e  $z$  é a altura de medida.

## 2.6. Determinação da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>)

Para a determinação da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foram utilizados dados diários da temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e o saldo de radiação medidos na Estação Agrometeorológica Automática do Campo Experimental da Caatinga, localizada à cerca de 4 km da torre micrometeorológica. Neste caso, o cálculo da ET<sub>o</sub> foi realizado em escala diária, de acordo com o modelo de Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (7)$$

em que  $R_n$  é o saldo de radiação sobre a superfície da cultura de referência ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $G$  = fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $T$  é temperatura do ar ( $^\circ\text{C}$ );  $u_2$  é a velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ );  $(e_s - e_a)$  é o déficit de pressão vapor d'água ( $\text{kPa}$ );  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

## 2.7. Determinação da evapotranspiração real da caatinga (ETr)

Na obtenção da evapotranspiração real foram utilizados dados de LE ( $W m^{-2}$ ). Posteriormente, estes valores foram integrados para totais diários ( $mm dia^{-1}$ ) por meio da expressão abaixo:

$$ETr = \frac{LE \times t \times f_{tempo}}{L} \quad (8)$$

em que t é o intervalo de armazenamento dos valores médios (30 minutos),  $f_{tempo}$  é o fator de ajuste de tempo (60 segundos) e L é o calor latente de vaporização ( $kJ kg^{-1}$ ).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Caracterização micrometeorológicas

Foi registrada uma lâmina de chuva acumulada de apenas  $92,24 mm ano^{-1}$  (com 90% deste total ocorridos entre os meses de janeiro e maio), valor muito inferior ao da normal climatológica da região ( $510 mm$  anuais) (EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2013). A seca mais recente do Nordeste (2011-2013, com maior destaque para os anos de 2012-2013) tem sido considerada uma das piores nos últimos cem anos (CEARÁ, 2013; GUITIÉRREZ et al., 2014). Tal fenômeno tem sido atribuído, principalmente, à variação da temperatura da superfície do mar do Oceano Atlântico, a qual foi marcada no referido ano pela ocorrência de anomalia positiva de  $\pm 0,52^{\circ}C$  no Norte do Atlântico, caracterizando o fenômeno Dipolo do Atlântico, que interferiu no deslocamento da Zona de Convergência Intertropical e, conseqüentemente, no regime pluviométrico da região Nordeste (CPTEC, 2014; GUIETIÉRREZ et al., 2014). Como resultado da redução da precipitação foram observadas alterações em todos os elementos meteorológicos durante o ano de 2012. O ano iniciou-se com valores elevados de radiação solar global (Qg) atingindo, em média,  $23,0 MJ m^{-2} dia^{-1}$  posteriormente, com a mudança nas estações do ano foi observada uma redução da Qg durante o inverno, seguindo uma tendência de aumento durante a primavera e o verão (Figura 1a). Este comportamento da radiação teve influência direta na temperatura do solo, que atingiu valores médios diários elevados que oscilaram entre  $34$  e  $38^{\circ}C$ , com mínimos próximos

a 26°C (Figura 1b). A temperatura e a umidade relativa do ar mantiveram um comportamento praticamente constante ao longo do ano, com valores médios diários em torno de 26,87°C ( $\pm 1,5^\circ\text{C}$ ) e 49,11% ( $\pm 4,2\%$ ) (Figura 1c e a, respectivamente). Que resultaram em um déficit de pressão de vapor que oscilou entre 1,42 e 2,39 kPa, com valor médio anual da ordem de 1,95 kPa (Figura 1c).

### **3.2. Análise sazonal dos componentes do balanço de energia**

O padrão sazonal do saldo de radiação ( $R_n$ ) em 2012 seguiu aproximadamente a variação da  $Q_g$ , apresentando valores totais diários máximos, médios e mínimos em torno de 18, 11 e 6 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Em média, durante todo o ano de 2012 pode-se constatar que maior parte da energia disponível foi destinada ao fluxo de calor sensível ( $H$ ) e não ao fluxo de calor latente ( $LE$ ) ou fluxo de calor no solo ( $G$ ) (Figura 2). Os valores diários do  $G$  apresentaram quase sempre comportamento levemente positivos, em torno de 0,16 ( $\pm 0,28$ ) MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, mas que representaram apenas 3% da energia disponível no sistema com pouca variação ao longo do ano, exceto nos dias em que houve chuva quando  $G$  atingiu valores mínimos de -1,28 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, indicando uma importante perda de energia da superfície do solo para a atmosfera.

A variação temporal do  $H$ , por outro lado, foi concomitante ao padrão de variação do  $R_n$ . Neste caso, a partição  $H/R_n$  foi em média 77% durante o ano, oscilando entre 63% nos meses de maior disponibilidade de água e 89% (Figura 3) nos meses mais secos do ano (Tabela 2).

A maior utilização da energia disponível para o fluxo de calor sensível em ecossistemas naturais tem sido um comportamento bastante evidenciado em regiões áridas e semiáridas em decorrência da disponibilidade hídrica reduzida ocasionada pelos volumes pluviométricos baixos observados nestes locais. Teixeira et al. (2008) em estudo realizado em uma área de caatinga em Petrolina-PE durante os anos de 2004 e 2005, evidenciaram uma partição da energia para o  $H$  em torno de 49% e 63%, para os respectivos anos na ordem em que foram mencionados. No caso do presente estudo o aumento desta componente foi incrementado em decorrência do aumento de deficiência hídrica no sistema solo-atmosfera resultante dos baixos volumes pluviométricos observados em 2012, sob estas condições uma redução da disponibilidade hídrica culminou no aumento da fração da energia destinada ao aquecimento do ambiente.

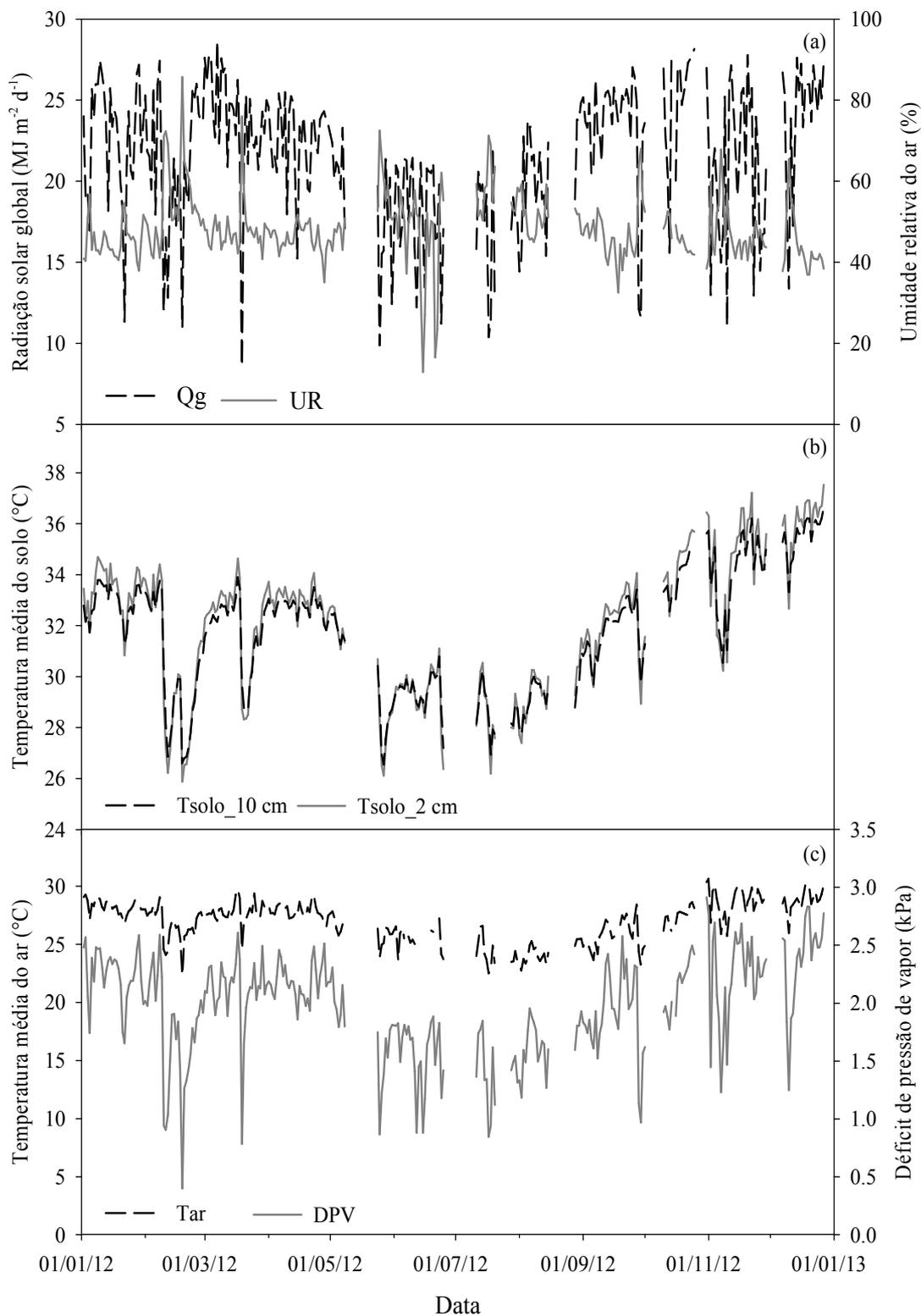


Figura 1 - Radiação solar global ( $Q_g$ , MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), umidade relativa do ar (UR, %) (a), temperatura do solo a 10 cm e 2 cm (b), e temperatura média do ar ( $T_{ar}$ , °C) e déficit de pressão de vapor (DPV, kPa) (c) sobre a caatinga, durante um ano seco em Petrolina-PE.

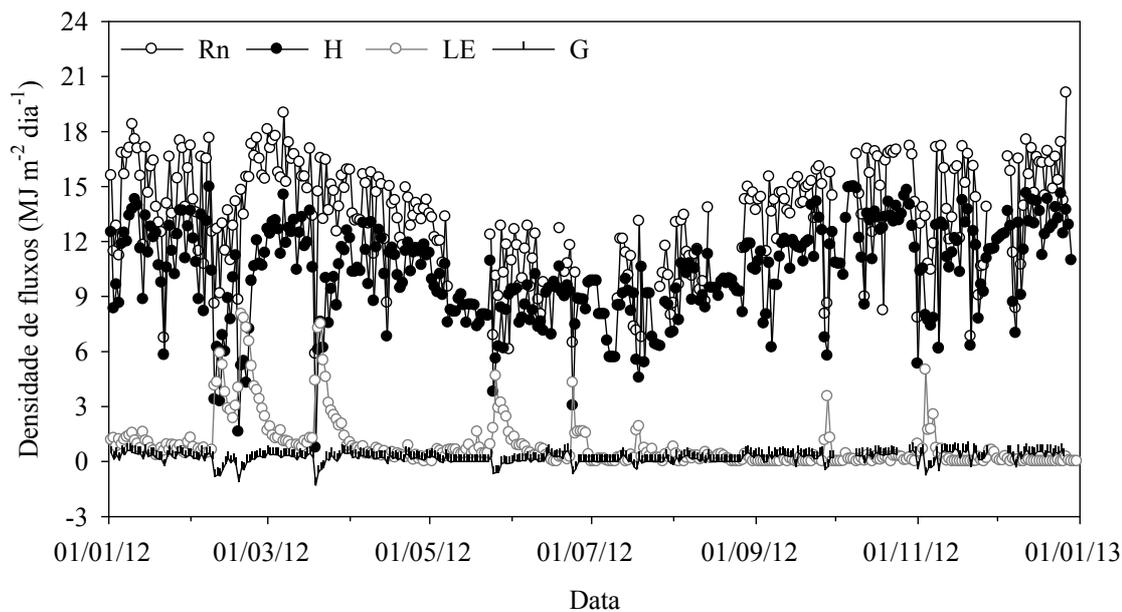


Figura 2 - Densidade de fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e calor no solo (G) durante o ano de 2012 em uma área de caatinga preservada, Petrolina-PE.

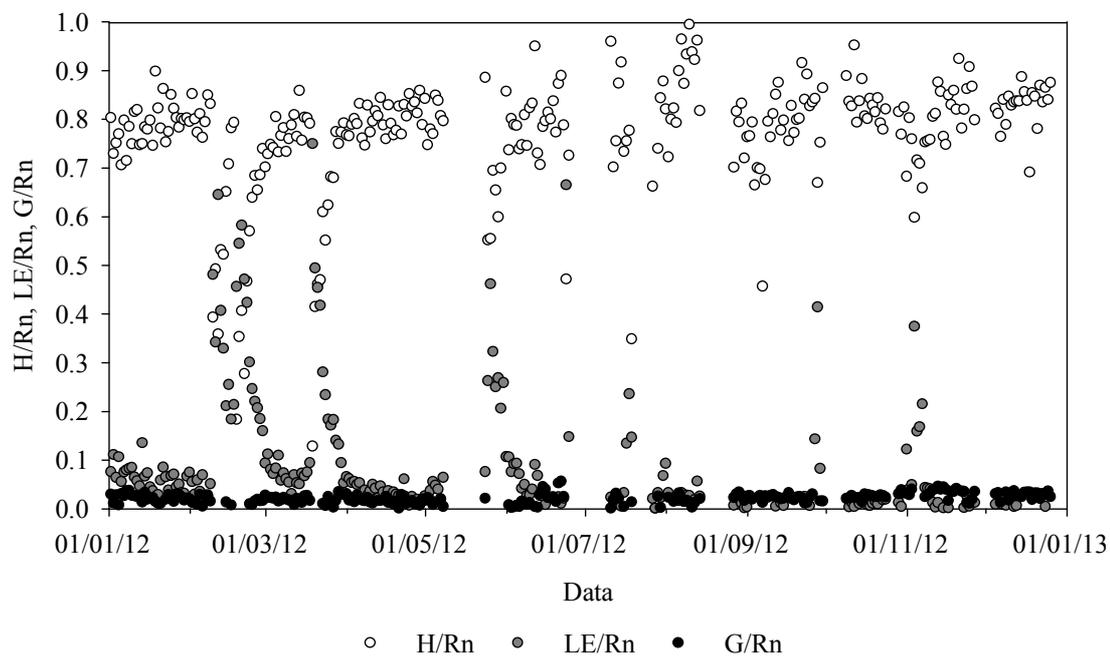


Figura 3 - Partição do saldo de radiação (Rn) nos fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e de calor no solo (G), durante o ano de 2012 em uma área de caatinga preservada, Petrolina-PE.

Tabela 2 - Valores médios diários dos componentes do balanço de energia para a Caatinga preservada durante o ano de 2012: Saldo de radiação (Rn), Fluxo de calor latente (LE), Fluxo de calor sensível (H), relação entre o fluxo de calor latente e o saldo de radiação (LE/Rn), relação entre o fluxo de calor sensível e o saldo de radiação (H/Rn), relação entre o fluxo de calor no solo e o saldo de radiação (G/Rn)

Mês	Rn (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	LE (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	H (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	LE/Rn (-)	H/Rn (-)	G/Rn (-)
Janeiro	14,8	0,9	11,6	0,06	0,79	0,02
Fevereiro	13,9	3,3	8,9	0,25	0,63	0,01
Março	15,3	2,2	10,9	0,16	0,69	0,02
Abril	13,6	0,4	11,0	0,03	0,80	0,02
Mai	11,0	1,1	8,4	0,15	0,78	0,01
Junho	10,5	0,8	8,6	0,07	0,78	0,02
Julho	10,1	0,3	7,6	0,04	0,70	0,01
Agosto	11,4	0,2	9,7	0,03	0,86	0,02
Setembro	13,3	0,3	10,8	0,02	0,77	0,02
Outubro	15,2	0,1	12,9	0,01	0,83	0,02
Novembro	13,0	0,6	10,4	0,05	0,79	0,02
Dezembro	15,1	0,1	12,5	0,00	0,83	0,03
Média	13,1	0,8	10,3	0,07	0,77	0,02
CV (%)	1,90	0,96	1,7	0,074	0,067	0,006

O ano iniciou com baixos valores de LE, em decorrência da baixa disponibilidade de água no ecossistema e atingiram valores médios diários que oscilaram de 3,3 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (LE/Rn = 25%) no mês de fevereiro à 0,08 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> no mês de dezembro. Apenas em dias em que ocorreram eventos de precipitação, os valores diários de LE foram mais elevados, atingindo máximos em torno de 8 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (LE/Rn = 60%) (Figura 2). Com o passar do tempo a redução da disponibilidade de água no solo, culminou novamente em diminuição deste parâmetro que atingiu valores médios diários em torno de 0,03 (Tabela 2), representando cerca de apenas 3% da energia disponível (LE/Rn) (Figura 3) durante maior parte do ano, oito meses, e em média 7% durante o ano.

### 3.3. Fechamento do balanço de energia

Para a análise do fechamento do balanço de energia pelo método da *Covariância dos vórtices turbulentos (CVT)* foram utilizados os dados médios para

períodos de 30 minutos (Figura 5). Constatou-se boa correlação entre os valores de fluxos medidos pelo sistema EC e os medidos pelos sensores micrometeorológicos ( $R_n - G$ ), com  $R^2 = 0,91$ . O valor médio da razão entre  $(LE + H)$  e  $(R_n - G)$  foi de 75%, com raiz do erro médio quadrático (RMSE) de  $5,6 \text{ W m}^{-2}$  que correspondeu a 25% da energia disponível  $(R_n - G)$ . Esses resultados são satisfatórios diante do grande número de dados avaliados, permitindo avaliação positiva da qualidade dos dados de fluxos obtidos. Frequentemente, erros no fechamento entre 10 e 30% têm sido relatados na literatura. Wilson et al. (2002) realizaram um trabalho para analisar o fechamento do balanço de energia pelo método de EC em 22 localidades, com períodos de observações oscilando entre 1 e 4 anos e encontraram desigualdades entre  $(R_n - G)$  e  $(H + LE)$  que variaram de 15 a 30%, com média de 20%. Teixeira et al. (2008) analisando o fechamento do balanço de energia em escala diária em uma área de caatinga encontraram o valor de RMSE igual a  $1,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , equivalente ao erro de 10%, ao passo que Oliveira et al. (2006) encontraram erro igual a 15% para a mesma área que esses autores usando dados horários.

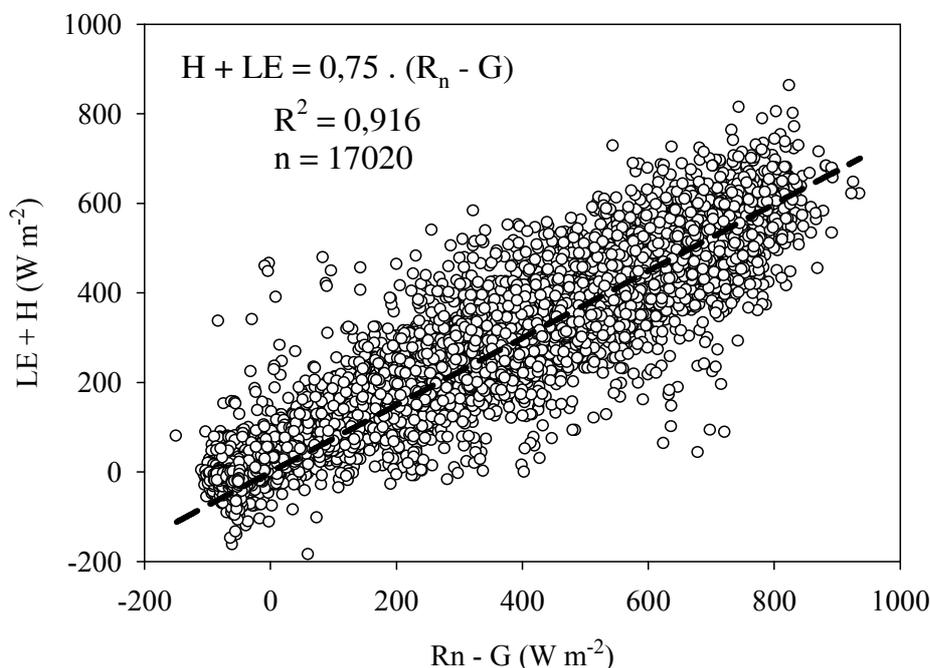


Figura 5 - Relação entre os dados horários da energia disponível no sistema ( $R_n - G$ ) obtida por meio de sensores micrometeorológicos e a soma do fluxo de calor sensível e latente ( $LE + H$ ) pela técnica da *Covariância dos vórtices turbulentos*. ( $n$  = número de dados).

O não fechamento do balanço de energia em regiões semiáridas e áridas tem sido atribuído a vários fatores. Tal constatação pode ser atribuída aos seguintes motivos: (1) negligência de outros sumidouros de energia, como por exemplo, a energia bioquímica utilizada na fotossíntese e a variação no armazenamento de calor na vegetação (WILSON et al., 2002; LI et al., 2006); (2) gradiente de temperatura nas camadas superiores do solo que promovem dentre outros fatores o armazenamento de calor nas camadas acima do sensor (LI et al., 2006).

### 3.4. Variação sazonal e controles da evapotranspiração

A análise sazonal da evapotranspiração da Caatinga (ETr) permite observar a ocorrência de valores bastante inferiores aos da evapotranspiração de referência (ETo), representando em média cerca de 7% da ETo (Figura 6), em decorrência principalmente da baixa disponibilidade hídrica observada na região.

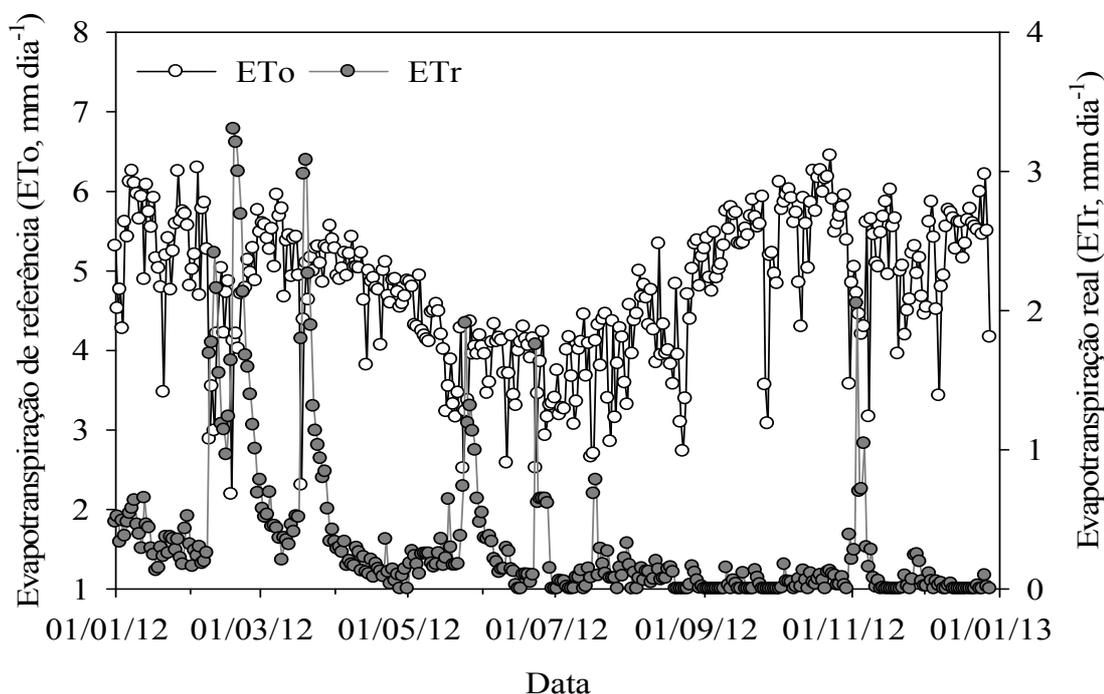


Figura 6 - Variação sazonal da evapotranspiração de referência (ETo) e da evapotranspiração da Caatinga (ETr), obtidos durante o ano de 2012 em Petrolina-PE.

No início do ano mesmo com a presença de cobertura foliar na vegetação (IAF = 2,64 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) foram observados valores baixos de ETr com uma média diária igual a 0,5 mm dia<sup>-1</sup>. Até o final do mês de fevereiro e meados de março quando ocorreram alguns eventos de chuva houve o aumento da disponibilidade hídrica no ecossistema possibilitando um incremento da ETr a qual atingiu valores máximos diários de 3,0 mm dia<sup>-1</sup>. Nos dias seguintes à demanda atmosférica substancialmente elevada, representada por um déficit de pressão de vapor (DPV) médio diário em torno de 2,2 kPa ocorreu a redução da disponibilidade hídrica no sistema ocasionando diminuição nos valores da ETr os quais permaneceram aproximadamente nulos. Neste caso, embora tenha sido constatado um longo período de completa restrição hídrica, cerca de quatro meses, observou-se grande capacidade das espécies em responder às variações do ambiente, com recuperação rápida da biomassa foliar e resposta da ETr no mês de novembro (2,0 mm dia<sup>-1</sup>).

Como uma vegetação típica de regiões Semiáridas observa-se que a Caatinga apresenta forte controle à perda de água para a atmosfera, representada pela resistência da superfície ( $r_s$ ) a qual atingiu valores máximos diários de até 9000 s m<sup>-1</sup>, com média anual igual a 2377 s m<sup>-1</sup> (Figura 7). Teixeira et al. (2008) analisando a Caatinga em um ano chuvoso (2004) (P = 786,5 mm) encontraram valores de “ $r_s$ ” iguais a 1542 s m<sup>-1</sup>, enquanto que no ano de 2005, quando a precipitação foi próxima da normal climatológica da região (P= 525 mm), os valores de “ $r_s$ ” foram de 2332 s m<sup>-1</sup>, com máximos aproximando-se de 7200 s m<sup>-1</sup>, observados a partir do mês de agosto. Os altos valores encontrados neste estudo demonstram a capacidade da vegetação em se ajustar as variações da atmosfera, permanecendo os valores de ETr sempre em torno de 0,5 mm dia<sup>-1</sup>.

Esta forte sensibilidade da vegetação a atmosfera pode ser constatada por meio dos valores do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ) os quais foram bastante baixos, em torno de 0,04, durante o mês de janeiro, quando a Caatinga apresentava o IAF em torno de 2,64 ± 0,08 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, atingindo valores máximos diários de 0,38 (Figura 7).

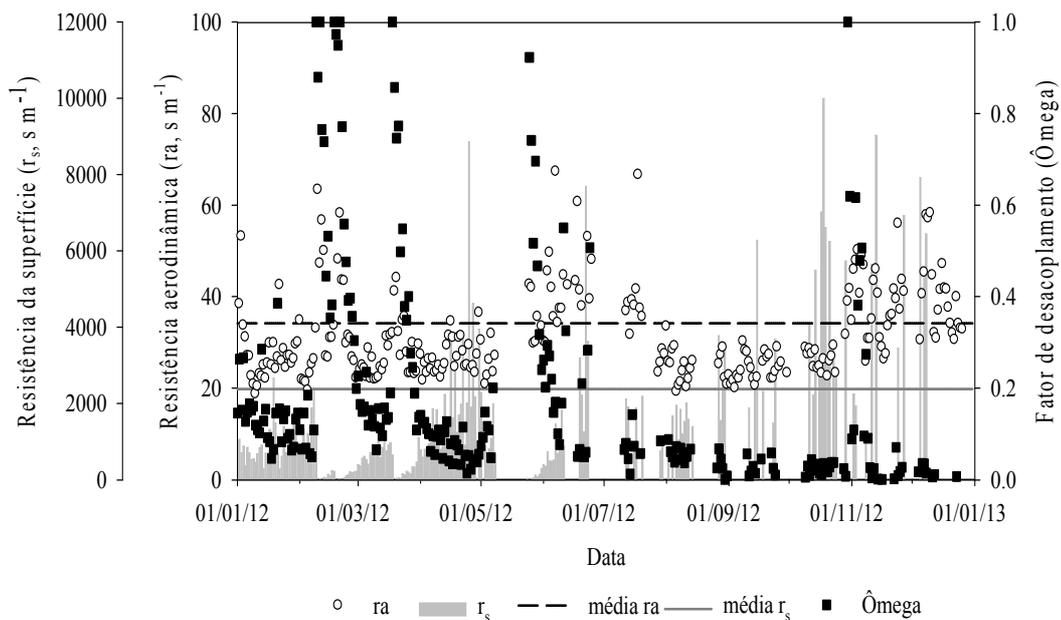


Figura 7 - Comportamento da resistência aerodinâmica, resistência do dossel e fator de desacoplamento da Caatinga preservada durante o ano de 2012, Petrolina-PE.

Neste período a ET foi governada principalmente pela condutância da superfície e o déficit de pressão de vapor. No final de fevereiro e março, por ocasião de eventos de precipitação um incremento da ET ( $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) resultou no aumento de  $\Omega$ . Neste caso, a presença de água no sistema ocasionou resposta rápida da vegetação que demonstrou-se desacoplada da atmosfera ( $\Omega = 1$ ), apresentando resistência da superfície ( $r_s$ ) praticamente nula e resistência aerodinâmica alta, em torno de  $50 \text{ s m}^{-1}$ . Esses resultados ressaltam a importância da energia disponível e no processo de ET quando existe disponibilidade de água na Caatinga em relação, a menor importância do controle estomático. O comportamento da ET neste caso foi controlado especialmente pela radiação solar e a resistência aerodinâmica, com valores de  $\Omega = 1$ . A resistência imposta pela superfície atingiu nestes dias os menores valores anuais, em torno de  $5 \text{ s m}^{-1}$ , que demonstraram o maior desacoplamento com a atmosfera. Resultados semelhantes foram observados em diferentes ecossistemas naturais (SOUZA FILHO, 2002; CIENCIALA et al., 2000; WULLSCHLEGER et al., 2000).

Em dias secos, que compreendem a maior parte do período no presente estudo (349 dias) pode-se constatar que a ETr foi governada principalmente pelo déficit de pressão de vapor (DPV) e a resistência da superfície ( $r_s$ ), com valores de  $\Omega$  próximos de zero (Figura 7). O comportamento de  $\Omega$  demonstra a existência de um forte

acoplamento entre a superfície e a atmosfera. Um bom acoplamento entre a superfície e a vegetação normalmente tem sido observado quando esta apresenta porte médio à alto, com altos valores de  $r_s$ , copa aberta e folhas pequenas (MARTIN et al., 2001).

Martin et al. (2001) relataram que em vegetação de porte médio abaixo que apresentam dossel espaçado e folhas pequenas, como é o caso da Caatinga, tem-se observado baixos valores de  $\Omega$ , os quais oscilam entre 0 e 0,2. Nestes casos a ocorrência de valores praticamente nulos pode ser atribuída dentre outros fatores a alta capacidade da vegetação de se ajustar as condições ambientais estressantes, especialmente o déficit hídrico. Na caatinga o déficit hídrico acentuado, verificado em 2012 resultou em uma abscisão foliar antecipada que teve início no mês de maio, permanecendo por um longo período nesta condição.

#### 4. CONCLUSÕES

O saldo de radiação apresentou uma forte sazonalidade com comportamento dependente da variação da radiação solar.

A partição dos componentes do balanço de energia destinada ao fluxo de calor sensível foi maximizada pela ocorrência da seca prolongada.

O fechamento do balanço de energia ocorreu de forma satisfatória indicando boas medidas realizadas pela técnica da Covariância dos Vórtices Turbulentos.

A evapotranspiração sob condições de seca intensa foi especialmente dependente do déficit de pressão de vapor (DPV) e do controle da superfície ( $r_s$ ).

No mês de novembro, mesmo após a demanda atmosférica elevada, a superfície apresentou grande capacidade de resposta ao ambiente.

#### 5. REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 279 p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper, 56).

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. San Diego:Academic Press, 2001. 420p

BALDOCCHI, D.; HICKS, B. B.; MEYERS, T. P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, v. 69, p. 1331-1340, 1988.

BALDOCCHI, D. D.; XU, L. K.; NANCY, K. How plant functional type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 123, p. 13-39, 2004

CAMPBELL, G.S; NORMAN, J.M. **An Introduction to Environmental Biophysics**. Springer, New York, p. 286, 1998..

CEARÁ, 2013. Comissão Especial da Assembléia Legislativa para Acompanhar a Problemática da Estiagem e as Perspectivas de Chuvas no Estado do Ceará, Relatório Final de Atividades, Julho.

CHEN, S.; CHEN, J.; LIN, G.; ZHANG, W.; MIAO, H.; WEI, L.; HUANG, J.; HAN, X. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 149, n. 11, p. 1800-1809, 2009.

CIENCIALA, E.; KUCERA, J.; MALMER, A. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. **Journal of Hydrology**, v. 236, 109-120, 2000.

CPTEC. **Centro de Previsões de tempo e Estudos Climáticos**. <http://www.cptec.inpe.br> (accessado em: 03.09.2014)

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian Journal Physiology*, v. 18, p. 55-81, 2006

EMBRAPA. **Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido**. Médias anuais da Estação Agrometeorológica de Bebedouro. Petrolina, 2013. Disponível em: <[http:// www.cpatia.embrapa.br:8080/servicos/dadosmet/ceb-anual.html](http://www.cpatia.embrapa.br:8080/servicos/dadosmet/ceb-anual.html)>. Acesso em: 17 08. 2014

FALGE, E, BALDOCCHI, D, OLSON, R, ANTHONI, P, AUBINET, M, BERNHOFER, C, BURBA, G, CEULEMANS, R, CLEMENT, R, DOLMAN, H, GRANIER, A, GROSS, P, GRUNWALD, T, HOLLINGER, D, JENSEN, NO, KATUL, G, KERONEN, P, KOWALSKI, A, LAI, CT, LAW, BE, MEYERS, T, MONCRIEFF, H, MOORS, E, MUNGER, JW, PILEGAARD, K, RANNIK, U, REBMANN, C, SUYKER, A, TENHUNEN, J, TU, K, VERMA, S, VESALA, T, WILSON, K & WOFYSY. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, n. 1, p. 43-69, 2001.

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

GOLDBERG, V.; BERNHOFER, C. Testing different decoupling coefficients with measurements and models of contrasting canopies and soil water conditions. **Annales Geophysicae**, v. 26, p. 1977-1992, 2008.

GUTIÉRREZ, A. P. A.; ENGLE, N. L.; NYS, E. D.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E. S. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95-106, 2014.

HSIEH, C. I.; KATUL, G.; CHI, T-W. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. **Adv. Water Resour.**, v. 23, p. 765-772, 2000.

IPCC. Climate Change 2007: **The physical science basis, Summary for Policymakers**. IPCC Geneva, 2007. 18p.

KRISHNAN, P.; MEYERS, T. P.; SCOTT, R. L.; KENNEDY, L.; HEUER, M. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semi-arid grasslands in North America. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 152, p. 31-44, 2012.

LI, S.-G., EUGSTER, W., ASANUMA, J., KOTANI, A., DAVAA, G., OYUNBAATAR, D., SUGITA, M. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 137, p. 89-106, 2006.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R. Irrigation requirements and transpiration coupling to the atmosphere of a citrus orchard in Southern Brazil, **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 1091-1096, 2011.

MCNAUGHTON, K. G.; JARVIS, P. G. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: Kozłowski, T. T. (ed.). Water deficits and plant growth. New York: **Academic Press**, 1983. v. 7, p. 1-47

MCMILLEN, R. T. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. **Boudary Layer Mateorology**. v. 43, p. 231-245, 1988.

MEINZER, F. C.; GRANTZ, D. A. Stomatal control of transpiration from a developing sugarcane canopy. **Plant Cell and Environmental**, v. 12, p. 635-642, 1989.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**. 2.ed. London: Edward Arnold, 1990. 291p

NOVICK, K. A.; STOY, P. C.; KATUL, G.G.; ELLSWORTH, D. S.; SIQUEIRA, M. S.B.; JUANG, J.; OREN, R. Carbon dioxide and water vapor exchange in a warm temperate grassland. **Oecologia**. v. 138, n. 2, p. 259-274, 2004.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, 166-174, 2006.

PEREIRA, A. R. The Priestley-Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 305-313, 2004.

REICHSTEIN, M.; FALGE, E.; BALDOCCHI, D. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1424-1439, 2005.

ROTENBERG, E.; YAKIR, D. **Contribution of semi-arid forests to the climate system**. Science. v. 327, 451 p, 2010.

SANTOS, S. A.; CORREIA, M. F.; ARAGÃO, M. R. S.; OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, E. P. Análise das trocas de água, energia e CO<sub>2</sub> em área de Caatinga: período úmido. **Ciência e Natura**. v. Especial, p. 147-150, 2011.

SANTOS, S. de. A.; CORREIA, M. de. F.; ARAGÃO, M. R. da. S.; SILVA, P. K. de. O. Aspectos da variabilidade sazonal da radiação, fluxos de energia e CO<sub>2</sub> em área de Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 4, p. 761-773, 2012.

SCHOTANUS, P.; NIEUWSTADT, F. T. M.; DE BRUIN, H. A. R. Temperature Measurement with a Sonic Anemometer and its Application to Heat and Moisture Fluctuations. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 26, p. 81-93, 1983.

SEAGER, R.; TING, M.F.; HELD, I. M.; KUSHNIR, Y.; LU, J.; VECCHI, G.; HUANG, H. P.; HARNIK, N.; LEETMAA, A.; LAU, N. C.; LI, C.; VELEZ, J.; NAIK, N. Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America. **Science** 316, 1181p, 2007.

SILVA, T. G. F. da.; ZOLNIER, S.; MOURA, M. S. B. de.; CARMO, J. F. A. do.; RIBEIRO, A. Fator de desacoplamento em um canal irrigado no submédio do Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 16, n. 8, p. 849-857, 2012.

SOUZA FILHO, J. D. Da C. **Variação sazonal dos componentes do balanço de radiação e energia sobre a floresta de Caxiuanã**. 2002. 67 f, Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, 2002.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, N. D.; MOURA, M. S. B. DE; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, p. 110-127, 2008.

WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of the flux measurement for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* v. 106, p. 85-100, 1980.

WILSON, K., GOLDSTEIN, A.; FALGE, E.; AUBINET, M.; BALDOCCHI, D.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; CEULEMANS, R.; DOLMAN, H.; FIELD, C.; GRELE, A.; IBROM, A.; LAW, B. E.; KOWALSKI, A.; MEYERS, T.; MONCRIEFF, J.; MONSON, R.; OECHEL, W.; TENHUNEN, J.; VALENTINI, R.; VERMA, S. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorologic**. v. 113, p. 223-243, 2002.

WULLSCHLEGER, S. D.; WILSON, K. B.; HANSON, P. J. Environmental control of whole-plant transpiration, canopy conductance and estimates of the decoupling coefficient for large red maple trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 104, p. 157-168, Agosto, 2000.

## CAPÍTULO 3

### VARIAÇÃO SAZONAL DAS TROCAS DE CARBONO EM UMA ÁREA DE CAATINGA NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO DURANTE UM ANO SECO

**RESUMO:** Com este trabalho objetivou-se analisar a variação sazonal dos componentes do balanço de carbono em uma área de Caatinga durante um ano seco na região de Petrolina-PE. O experimento foi conduzido durante o ano de 2012 em Petrolina, PE, localizado na região do semiárido brasileiro, com a utilização do sistema da *Covariância dos vórtices turbulentos* (CVT). As medições do fluxo de dióxido de carbono (NEE) foram realizadas a 16,9 metros de altura por meio de um anemômetro sônico tridimensional (para medir as flutuações médias da velocidade de vento - u, v, e w) acoplado a um analisador de gases a infravermelho em circuito aberto, para medidas do CO<sub>2</sub>, ambos operando a uma frequência de 16 Hz. Adicionalmente, foram determinados o conteúdo de água no solo e a variação da cobertura vegetal, bem como a variação dos elementos meteorológicos: temperatura e umidade do ar, radiação solar global e radiação fotossinteticamente ativa. Os dados dos fluxos de CO<sub>2</sub> foram processados com auxílio do programa *Alteddy* e analisados em escalas diária e sazonal. Foram determinadas as partições do fluxo líquido de carbono (NEE) na produtividade primária bruta (PPB) e na respiração do ecossistema (Re). Observou-se que a assimilação de dióxido de carbono e suas partições estiveram condicionados à precipitação pluvial, sendo que a ocorrência de baixas precipitações ( $P < 2\text{mm}$ ) na estação seca resultaram em picos de respiração. Durante o ano de 2012, a Caatinga atuou como uma fonte de carbono para a atmosfera, com uma emissão igual a  $468,18 \text{ gC m}^{-2}\text{ano}^{-1}$ . Estes resultados podem ser úteis na formulação de políticas públicas visando a redução dos impactos das mudanças do clima.

**Palavras-chave:** Covariância dos vórtices turbulentos, Caatinga, balanço de carbono, seca.

**ABSTRACT:** The objective of this study was to analyze the seasonal variation of carbon balance components in an area of preserved Caatinga during a dry year in the region of Petrolina. The experiment was conducted during the year of 2012 in Petrolina, PE, located in the Brazilian semiarid region, using the *Covariância dos vórtices turbulentos* (EC) system. The carbon dioxide (NEE) fluxes measurements were performed at 16 meters above the ground surface by means of a three-dimensional sonic anemometer to measure the average wind speed fluctuations (u, v, w) and an open circuit infrared gas analyzer for measuring CO<sub>2</sub> fluxes, both operating at a frequency of 16Hz. Additionally, it was determined the soil water content and the variation of vegetation cover and the variations of weather elements, as well: temperature, humidity, solar radiation and photosynthetically active radiation. The CO<sub>2</sub> data fluxes were processed using *Alteddy* and the results analyzed on daily and seasonal scales. The partitions of net carbon flux (NEE) into gross primary productivity (GPP) and ecosystem respiration (Re) were also analysed. Based on the results, it was observed that the carbon dioxide assimilation and its partitions have been conditioned to rainfall events. The occurrence of low rainfall events ( $P < 2\text{mm}$ ) in the dry season resulted in a maximum respiration peak. During the year of 2012, the Savanna served as a source of

carbon to the atmosphere, with an emission equal to  $468.18 \text{ gC m}^{-2}\text{year}^{-1}$ . These results may be useful in the formulation of public policies aiming to reduce the impacts of climate change on local climate.

**Keywords:** Covariância dos vórtices turbulentos, Caatinga, carbon balance, dry.

## 1. INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é um constituinte natural da atmosfera, presente em pequenas proporções em relação aos demais gases. Esse gás atingiu concentrações iguais a 180 ppm nos períodos glaciais e 280 ppm no período que antecedeu a Revolução Industrial (HUNSAKER et al., 2000). Porém, nas últimas décadas com o rápido crescimento das intervenções antropogênicas por meio dos processos de desmatamento, queimadas, utilização de combustíveis fósseis e as mudanças no uso do solo, a concentração do  $\text{CO}_2$  tem aumentado de forma significativa, apresentando atualmente concentração igual ou superior a 390 ppm. Esse gás, juntamente com o incremento de outros gases do efeito estufa, tais como: metano ( $\text{CH}_4$ ), o óxido nitroso ( $\text{NO}_2$ ) e o próprio vapor d'água tem determinado, de maneira cada vez mais consistente, mudanças no clima global (SIGH et al., 2009). Diante desse cenário, os governos têm debatido formas de minimizar as emissões do dióxido de carbono sem prejudicar, no entanto, o desenvolvimento econômico.

Dentre as formas de promover a redução da concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera está o “sequestro” desse gás para utilização no processo fotossintético por meio de organismos vegetais (YANG et al., 2011; CHEN et al., 2013). Neste sentido, tem-se observado, nos últimos anos, o aumento crescente na realização de estudos que visam analisar o balanço de carbono em diferentes espécies nativas ou cultivadas (SUYKER et al., 2003; CHEN et al., 2013; GILMANOV et al., 2007). Esses estudos compreendem a troca líquida de carbono de um ecossistema (NEE), que resulta da diferença entre o  $\text{CO}_2$  atmosférico, que é assimilado na fotossíntese, ou produtividade primária bruta (PPB) e o que é liberado pela vegetação por meio da respiração ( $\text{Re}$ ) (DESAI et al., 2008; GILMANOV et al., 2007).

Para as regiões áridas e semiáridas, estes estudos ainda são escassos e podem ser de grande importância, uma vez que estas áreas representam uma porção significativa das regiões continentais do globo terrestre. E embora a produtividade de biomassa vegetal nestas áreas tenha sido considerada baixa (aproximadamente  $6 \text{ kg m}^{-2}$

ano<sup>-1</sup>) quando comparadas aos demais ecossistemas (~10-18 kg m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>), estes detêm cerca de 15% do carbono orgânico e 20-30% do carbono inorgânico armazenados no mundo (TRUMPER et al., 2008).

A Caatinga compreende a vegetação presente no semiárido brasileiro que é composta por espécies de importância incontestável que apenas são encontradas nestas áreas. O clima da região é caracterizado por apresentar alta variabilidade espaço-temporal da precipitação, além de altas temperaturas e de radiação solar, sendo que neste caso, a maior parte das atividades de troca de carbono está associada à ocorrência de precipitação (SOUZA et al., 2013). Numerosos trabalhos têm reportado que a seca pode modificar substancialmente o desenvolvimento sazonal da área foliar e da fisiologia das plantas e, portanto, apresentar impacto significativo no consumo máximo de CO<sub>2</sub> pela vegetação (HUNT et al., 2002; YANG et al., 2011). Em regiões semiáridas passíveis de ocorrência de secas, a disponibilidade hídrica tem favorecido a retirada de carbono da atmosfera pela vegetação. Por outro lado, nos períodos mais secos podem ocorrer atividades de liberação significativas desse gás cuja quantificação é de extrema importância (CIAIS et al., 2005; LI et al., 2005).

Para a Caatinga, estudos que indiquem seu comportamento em atuar como fonte ou dreno de carbono para a atmosfera ainda são incipientes e praticamente inexistentes, sobretudo, em anos de secas extremas (OLIVEIRA et al., 2006; SANTOS et al., 2011). O conhecimento das respostas do ecossistema às mudanças ambientais é de interesse particular para melhor compreensão dos processos atuais que governam as trocas de dióxido de carbono, energia e vapor d'água. Esses conhecimentos são também necessários para atender os desafios sociais, como o impacto das alterações climáticas na disponibilidade de água e recursos naturais, bem como melhorar as estimativas do sumidouro de carbono terrestre para mitigar as emissões decorrentes da queima dos combustíveis fósseis.

Assim, objetivou-se com esse trabalho analisar a variação sazonal e diária dos componentes do balanço de carbono em uma área de Caatinga durante um ano anormalmente seco na região de Petrolina-PE.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Caracterização da área experimental**

O estudo foi conduzido na Estação Experimental da Caatinga, pertencente à Embrapa Semiárido (9,05°S; 40,32°W; 350m), município de Petrolina, PE. Em uma área preservada há mais de 40 anos com extensão de aproximadamente 600 há, a qual é composta por vegetação de caatinga hiperxerófila de porte arbustivo-arbóreo (com altura média de 5 metros), onde predominam as espécies *Poincianella microphylla*, *Croton conduplicatus*, *Bauhinia cheilantha*, *Manihot pseudoglaziovii*, e *Commiphora leptophloeos*.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é BSW<sub>h</sub>, ou seja, semiárido, com temperatura média anual é 26,2°C, umidade relativa média em torno de 64,4%, velocidade do vento de 190,4 km dia<sup>-1</sup>. Adicionalmente, a região é caracterizada por possuir irregularidade temporal e espacial no regime pluviométrico, com lâmina média anual da ordem de 510 mm, concentrados, principalmente, entre os meses de janeiro a abril, que compreende o período mais chuvoso.

### **2.2. Medições micrometeorológicas**

O período de medições micrometeorológicas compreendeu o ano de 2012, o qual foi caracterizado como sendo o mais seco dos últimos quarenta anos de acordo as lâminas de precipitação observadas para a região. Para determinação do fluxo de carbono utilizou-se o sistema da covariância dos vórtices turbulentos (CVT) instalado a altura de 16,9 metros acima da superfície do solo e aproximadamente 11,9 m da vegetação, orientados na direção predominante do vento (sudoeste). O sistema foi composto de um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3, Campbell Scientific, Logan, UT, EUA) e um analisador de gás a infravermelho de caminho aberto (LI-7500, Licor, Lincoln, NE, EUA), ambos encontravam-se afastados para minimizar as distorções do fluxo e com inclinação de cerca de 15°. Estes sensores foram ligados a um sistema de coleta de dados *datalogger* (CR-1000, Campbell Scientific, Logan UT).

### **2.3. Elementos meteorológicos**

Adicionalmente, foram instalados sensores para o monitoramento dos elementos meteorológicos: radiação solar, radiação fotossinteticamente ativa, temperatura do ar, umidade relativa e precipitação pluvial na área experimental. Nesse caso, a radiação solar global foi monitorada por meio de um piranômetro (modelo CM3, Kipp & Zonen, Delft, Netherlands), enquanto que a temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por meio de um sensor modelo HMP45C (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA), a precipitação pluvial foi determinada utilizando-se um pluviômetro de báscula (CS700-L Hydrological Services Rain Gauge, Liverpool, Austrália) e para a quantificação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), foram instalados quatro sensores *quantum*, sendo dois localizados acima da vegetação, um com face voltada para cima, e outro disposto de modo invertido com a face voltada para baixo, para medição da RFA incidente e refletida, respectivamente ( $RFA_T$  e  $RFA_R$ , LI-190SA, Li-cor, Nebraska, USA) e outros dois dispostos de maneira perpendicular abaixo da vegetação ( $RFA_B$ , LI-191SA, Li-cor, Nebraska, USA).

### **2.4. Monitoramento do conteúdo de água no solo**

Para determinação do conteúdo de água no solo foram realizadas campanhas em intervalos médios mensais no período seco, ou logo após a ocorrência de eventos de chuva. Neste caso, utilizou-se um trado de ferro, para obtenção de amostras de solo na camada de 0-0,5m, em camadas de 0,1m. As amostras de solo coletadas foram acondicionadas em latas de alumínio e vedadas com fita crepe para evitar perda de água para o ambiente. Posteriormente, estas amostras foram levadas ao laboratório de solos da Embrapa Semiárido, onde foram pesadas para obtenção da massa úmida da amostra e, logo em seguida foram colocadas em estufa, a 100°C, para obtenção da massa seca após o intervalo 48h. Com estes dados, foi determinada o teor de água no solo. Em seguida, estes dados foram multiplicados pela densidade do solo, determinada em laboratório para a aquisição do conteúdo de água no solo com base no volume.

## 2.5. Processamento, controle de qualidade e preenchimento de falhas dos dados

Os fluxos foram calculados em médias de 30 minutos utilizando-se o *software* Alteddy, versão 3.6 (Alterra, University of Wageningen, The Netherlands). Foram realizadas correções para minimizar o efeito do vento lateral na velocidade sônica, temperatura e vapor d'água por meio da rotação tridimensional das coordenadas. Além disso, aplicaram-se os filtros da velocidade de fricção do vento ( $u^*$ ) para descartar dados noturnos em baixas condições de mistura, por não serem representativos do fluxo líquido do ecossistema e para evitar condições advectivas, que tendem a ocorrer em condições de baixa turbulência atmosférica (VICKERS et al., 2011). Foi adotado o valor crítico de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  para  $u^*$ .

Para análise da qualidade dos dados, foram utilizados os critérios propostos por Foken (2004), considerando-se que dados com *flags* maiores que um não eram representativos da área de estudo, pois apresentavam-se como ruídos. Estes foram então excluídos e as lacunas preenchidas por meio do uso do algoritmo proposto por Falge et al. (2001) e Reichstein et al. (2005), disponível em: *Eddy covariance gap-filling & flux-partitioning tool* (<http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/>).

Esse algoritmo utiliza-se do método *look-up table*, tendo como dados de entrada os dados do fluxo de  $\text{CO}_2$ , das variáveis meteorológicas e a autocorrelação entre estes dados, que considera a manutenção da variação média diurna das variáveis e métodos semi-empíricos e preservam as respostas dos fluxos as condições onde as falhas são preenchidas, semelhante ao reportado por Falge et al. (2001). Adicionalmente, considera a covariância entre os fluxos e as variáveis meteorológicas (REICHSTEIN et al., 2005) de modo que os dados perdidos são preenchidos por um valor médio em condições meteorológicas semelhantes dentro de um intervalo de sete dias.

## 2.6. Particionamento dos fluxos de carbono no ecossistema: fluxo de carbono líquido (NEE), produção primária bruta (PPB) e respiração da caatinga

A produtividade primária líquida pode ser definida como a quantidade de energia solar, convertida pelas plantas, em matéria orgânica pela fotossíntese, ou também, como a diferença entre a fotossíntese total e a respiração autotrófica da vegetação natural, por unidade de tempo e área (FIELD et al., 1995; SUN et al., 2004;

FENG et al., 2007). Representa o acúmulo de carbono no ecossistema e podendo ser expressa pela seguinte equação:

$$NEE = PPB - R_e \quad (1)$$

em que NEE é fluxo de carbono líquido ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), PPB é produtividade primária bruta ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e  $R_e$  é respiração do ecossistema ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

Assim, os valores do NEE, para os períodos considerados, foram obtidos por meio das medições diretas do sistema da Covariância dos vórtices turbulentos.

## 2.7. Estimativa da produtividade primária bruta

### 2.7.1. Modelagem da respiração diurna e noturna

No caso do ecossistema, tem-se que o NEE medido pelo sistema da “Covariância dos vórtices turbulentos” durante o período noturno pode ser tratado como a respiração do mesmo, desde que a velocidade de fricção ( $u_*$ ) seja superior a  $0,25 \text{ m s}^{-1}$ , uma vez que a fotossíntese, nesse período, é nula (BALDOCCHI, et al., 2002; TENHUNEN, et al., 2002). Nos dias que a velocidade de fricção apresentou valores fora da abrangência do limite crítico, considerou-se que estes não foram representativos para caracterizar a respiração do ecossistema. Nesse caso, a respiração noturna e mesmo a diurna foram estimadas utilizando o modelo de Lloyd & Taylor (1994) que considera a dependência da respiração do ecossistema com a temperatura conforme descrito por Reichstein et al. (2005):

$$R_e = R_{ref}(t) e^{\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{soil}(t)}\right) - \left(\frac{1}{T_{soil}(t)} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2)$$

em que  $R$  é a respiração do ecossistema,  $T_{ref}$  é a temperatura de referência,  $T_{soil}$  é a o solo à profundidade de 5 cm e  $T_0$  é uma constante =  $46,02^\circ\text{C}$ .

Assim, a produção primária bruta (PPB) que representa toda a quantidade de carbono fixada pela vegetação durante a fotossíntese foi obtida pela equação 1.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Condições ambientais

Na Figura 1 é apresentado o comportamento das variáveis meteorológicas monitoradas para a área de caatinga preservada durante o ano de 2012. Nesse ano o fenômeno Dipolo do Atlântico propiciou a ocorrência de valores elevados dos elementos meteorológicos. Neste sentido, o ano iniciou com temperaturas altas, com média ( $T_m$ ) da ordem de  $27,5^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1,27$ ), atingindo valores máximos iguais a  $29,7^{\circ}\text{C}$ , e mínimos de  $22,4^{\circ}\text{C}$  (Figura 1a), com tendência à redução no começo de fevereiro quando se verificou o início da ocorrência de eventos de chuva. No período chuvoso da região (janeiro-abril), foram registrados volumes de precipitação acumulada muito baixos da ordem de 71 mm, com total anual acumulado de 92,24 mm (Figura 1). A radiação solar, por outro lado, foi alta apresentando média de  $23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , e tendência à redução entre os meses de junho e setembro, quando se constata o início do inverno na região.

A associação dos baixos índices de precipitação com alta insolação e temperaturas elevadas, resultou em alta demanda atmosférica. Neste sentido, verificou-se a ocorrência de elevados valores do déficit de pressão de vapor e, conseqüentemente, umidade relativa média baixa, em torno de 2,0 kPa e 50%, respectivamente. Conforme observado, o conteúdo de água no solo permaneceu baixo durante todo o ano de 2012, apresentando valores entre 0,02 à  $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Esta restrição hídrica resultou em queda antecipada da folhagem da vegetação que influenciou de forma direta nos fluxos de carbono da vegetação.

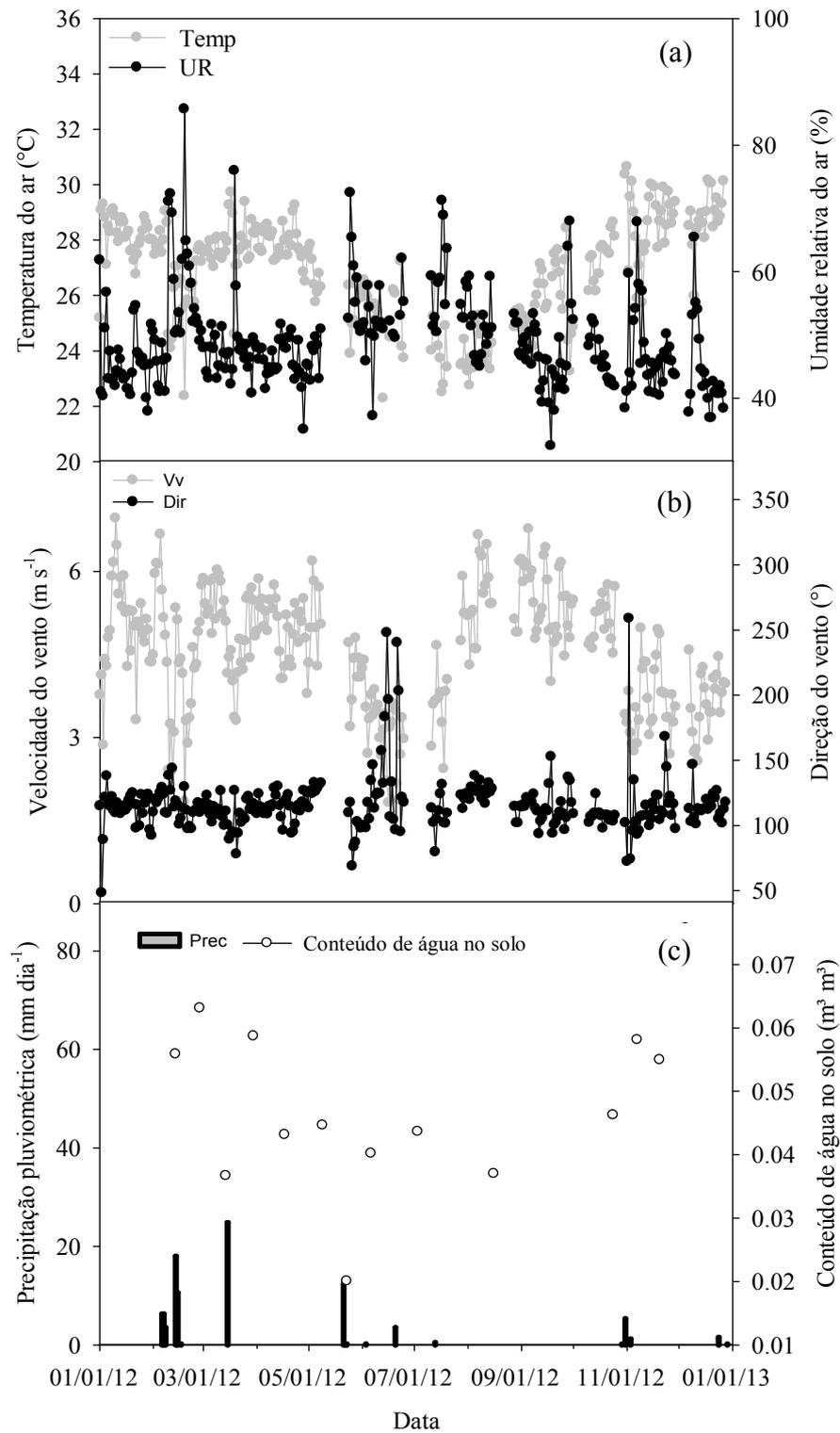


Figura 2 - Comportamento dos elementos meteorológicos: temperatura e umidade do ar (a), velocidade e direção do vento (b), precipitação pluvial e conteúdo de água no solo (c) em uma área de Caatinga durante o período de janeiro de 2012 a maio de 2013 no Campo Experimental da Caatinga, Petrolina-PE.

### 3.2. Variação sazonal do Fluxo líquido de CO<sub>2</sub> (NEE), produtividade primária bruta do (PPB) e respiração do ecossistema (Re)

A severidade da seca fez-se sentir durante todo o ano de 2012, especialmente a partir do inverno da região quando o conteúdo de água no solo atingiu valores próximos a 4%. Como consequência, o fluxo líquido de dióxido de carbono (NEE) manteve-se positivo durante maior parte do ano. Neste caso, o mês de janeiro iniciou com valores altos do NEE que oscilaram entre -1 e 5  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , com média igual a 1,17  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , indicando que neste período embora o índice de área foliar fosse elevado (IAF = 2,64  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ), em decorrência da disponibilidade hídrica reduzida o fluxo de CO<sub>2</sub> ocorria da vegetação para a atmosfera. Comportamento semelhante foi observado por Oliveira et al. (2006), que trabalhando com a Caatinga durante o período de julho de 2004 a julho de 2005, quando a precipitação total foi de 501 mm, também observaram que o ecossistema atuou como fonte de CO<sub>2</sub> para a atmosfera durante o mês de janeiro (NEE = 1,17  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

Nos meses de fevereiro e março essa liberação ocorreu de forma menos positiva (NEE = 1,01  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) devido aos eventos de precipitação que totalizaram apenas 68,8 mm durante os dois meses. Nesse intervalo, foram observados picos de NEE que oscilaram entre 13,93 a -17,69  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , representando a máxima liberação e assimilação do CO<sub>2</sub> atmosférico, respectivamente. Com o início da senescência das folhas, que ocorreu em maio, pode-se constatar um aumento na NEE, igual a 1,65  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  com picos de até 8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  o que provavelmente está associado ao início da decomposição da matéria orgânica com consequente liberação do CO<sub>2</sub>. Além da respiração por organismos heterotróficos que segundo Catellan & Vidor (1990) tem sua atividade metabólica favorecida na presença de matéria orgânica no solo.

Durante o inverno, que compreende o período de junho a setembro, observou-se que houve redução no NEE, que apresentou valor médio para o período igual a 1,06  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , associados à redução da temperatura do ar e do solo, (24,6 e 29,2°C, respectivamente), que promovem redução da atividade microbiana e consequentemente da liberação do CO<sub>2</sub> armazenado no solo. Posteriormente, por ocasião da primavera e logo após o início do verão, pode-se constatar um novo aumento do NEE (1,48  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) associados ao incremento da temperatura do ar, que segundo Xu e Baldocchi (2004), podem ocasionar aumento da respiração do ecossistema.

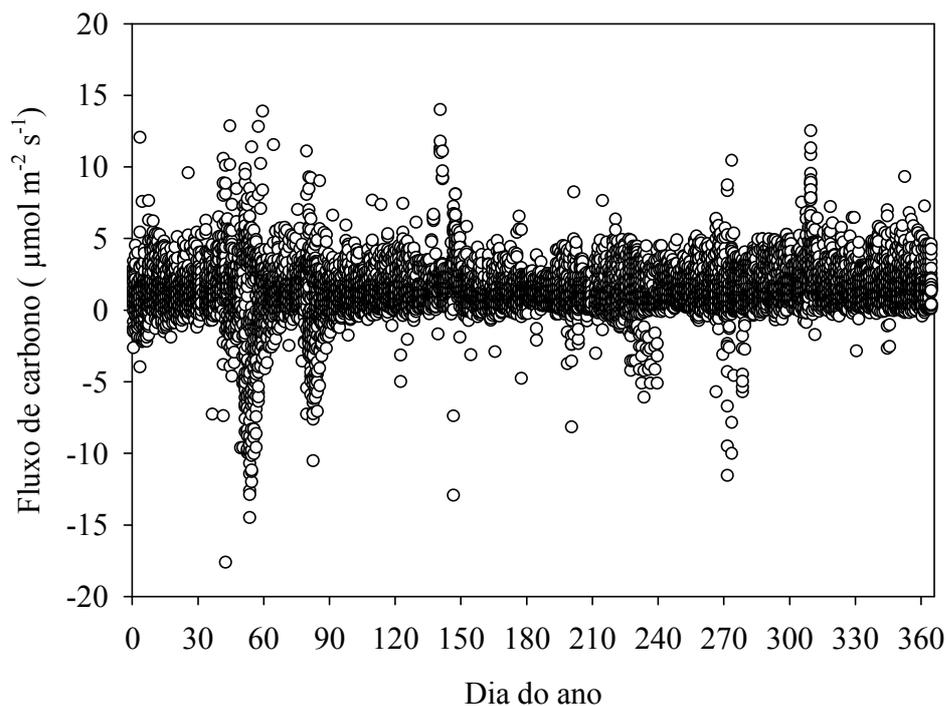


Figura 3 - Fluxo líquido de CO<sub>2</sub> mensurados em intervalos horários em uma área de caatinga preservada durante um ano seco em Petrolina-PE.

Quando se analisou a partição do fluxo líquido de carbono para a Caatinga durante o ano de 2012, em relação à precipitação, pode-se constatar que devido ao volume pluviométrico baixo o ecossistema atuou na maior parte do ano como fonte de carbono para a atmosfera ( $NEE = 1,3 \text{ gC m}^2 \text{ d}^{-1}$ ) (Figura 4). No início do ano a vegetação apresentou um IAF relativamente elevado ( $IAF = 2,64 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ). Todavia, a ausência de precipitação e o baixo conteúdo de água, ocasionaram uma forte resistência da superfície ( $r_s = 903 \text{ s m}^{-1}$ ) ao efluxo de água para atmosfera e conseqüentemente o influxo de CO<sub>2</sub> para o interior da vegetação.

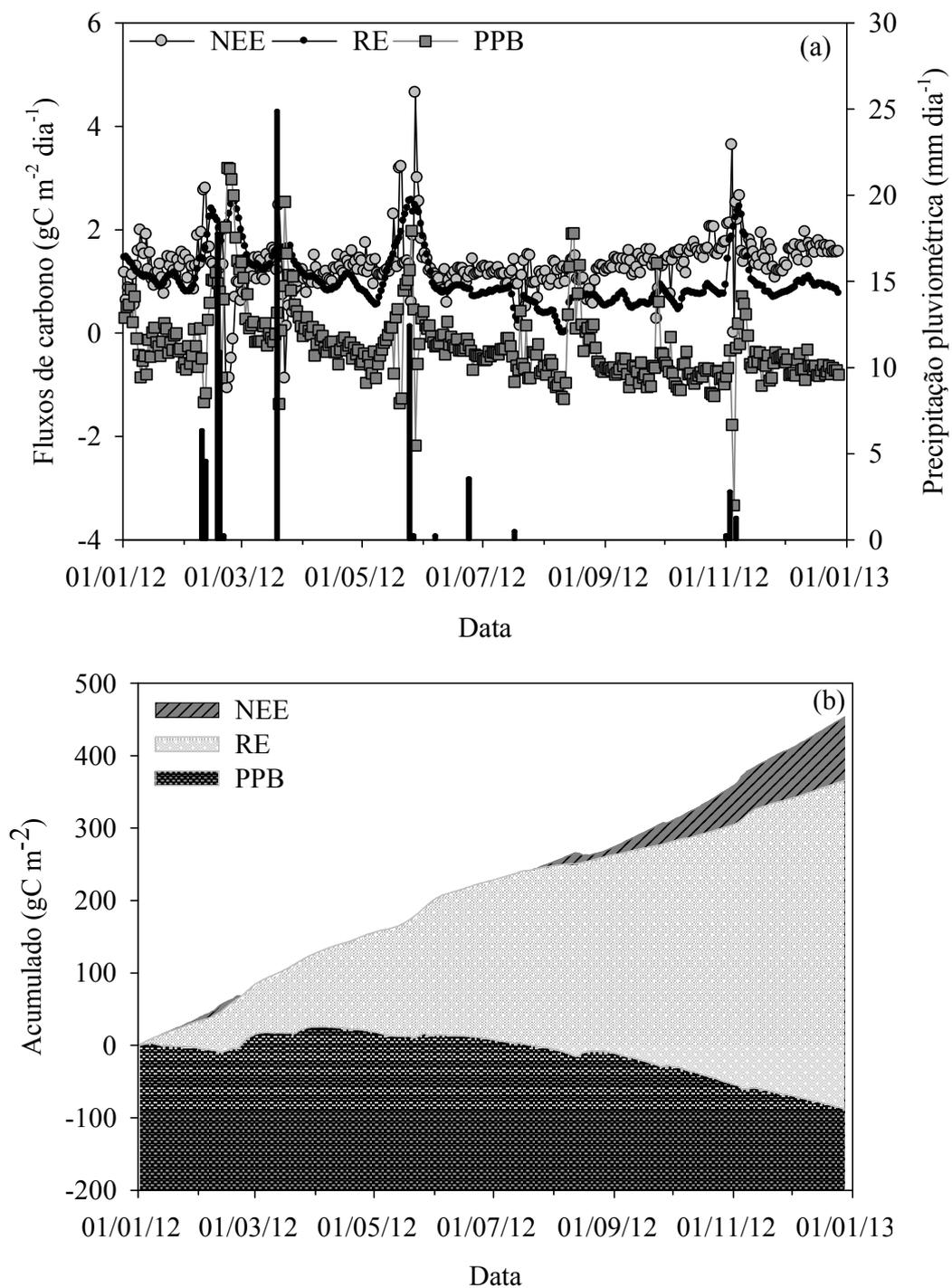


Figura 4 - Variação diária do fluxo de  $\text{CO}_2$  líquido (NEE), produtividade primária bruta (PPB) e respiração do ecossistema (RE) componentes do balanço de carbono e da precipitação pluvial (a) e valores acumulados dos fluxos (b) em uma área de Caatinga preservada durante um ano seco, Petrolina-PE.

O papel do ecossistema como um sumidouro do CO<sub>2</sub> atmosférico esteve condicionado à ocorrência de eventos de precipitação. Quando foram observadas reduções da resistência da superfície ( $r_s = 53 \text{ s m}^{-1}$ ), ocorreu maior consumo de CO<sub>2</sub> pela vegetação e totais diários máximos de NEE, PPB e Re iguais a -1,07, 3,2 e 2,3 gCm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, nesta ordem. Este comportamento, no entanto, foi limitado aos dias de ocorrência de precipitação (apenas 4 dias) e em cerca de quatro ou cinco dias subsequentes quando chuvas fortes ( $P > 10\text{mm}$ ) contribuíram para o crescimento da vegetação. Por outro lado, a ocorrência de pequenos eventos de chuva durante a estação seca, como os observados no mês de novembro ( $P < 2\text{mm}$ ), promoveram picos de respiração de até 2,4 gC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> que segundo Wu e Brooks (2005) são decorrentes do estímulo da respiração microbológica depois do aumento súbito do conteúdo de água no solo e mesmo pelo fato de este volume ser insuficiente para estimular a formação de nova biomassa. Vários estudos têm reportado a ocorrência de pulsos de respiração imediatamente após a ocorrência de eventos isolados de precipitação em condições de campo, que são evidenciados principalmente na estação seca (XU; BALDOCCHI, 2004; ZHAO et al., 2006; JARVIS et al., 2007).

O volume de precipitação reduzido teve impacto negativo sobre o balanço de carbono da Caatinga, culminando na liberação de CO<sub>2</sub> acumulada para a atmosfera (NEE) de 468,18 gC m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup> e uma Re igual a 371,73 gC m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>. Aires et al. (2008), em estudo realizado em pastagem mediterrânica em dois anos distintos, sendo um representado pela disponibilidade hídrica ( $P = 751,2 \text{ mm ano}^{-1}$ ) e outro pela ocorrência de precipitação reduzida ( $P = 363 \text{ mm ano}^{-1}$ ), observaram que em condições de déficit hídrico o ecossistema também atuou como uma fonte de CO<sub>2</sub> para atmosfera (NEE = 49 gC m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>). No caso da Caatinga, alguns estudos têm demonstrado seu potencial em capturar carbono em condições de disponibilidade hídrica (OLIVEIRA et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2005). Contudo, de acordo com Aires et al. (2008) um fato preocupante está associado ao aumento das temperaturas médias e a ocorrência de secas cada vez mais frequentes e prolongadas, é que tais condições podem favorecer a maior liberação do CO<sub>2</sub> para a atmosfera e tornar determinados ecossistemas potencializadores das alterações climáticas.

### **3.3. Variação horária do fluxo líquido de CO<sub>2</sub> (NEE), produtividade primária bruta (PPB) e respiração do ecossistema (Re) e variáveis meteorológicas**

Para analisar o comportamento diário dos componentes do balanço de carbono, em escala horária, e suas relações com os elementos meteorológicos, foram selecionados dias representativos para as condições de disponibilidade hídrica, senescência foliar e da estação seca. Pode-se constatar que em condições de disponibilidade hídrica (Figura 5a) o ecossistema se comportou como um sumidouro de CO<sub>2</sub>, quando observa-se uma relação entre o comportamento do fluxo líquido de carbono e da radiação fotossinteticamente ativa (RFA > 0), expressas nas curvas diárias. Nesse caso, a fixação máxima do carbono ( $\sim 9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), representada pelo NEE ocorre, principalmente, nos momentos de maior disponibilidade de radiação fotossinteticamente ativa, quando os valores de PPB atingem picos máximos próximos de  $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Posteriormente, com a redução da incidência da RFA e mesmo o aumento da demanda atmosférica (DPV = 2,2 kPa), constata-se redução da PPB que atinge valores mínimos em torno de  $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  próximo as 18h.

Durante o período noturno (18 às 6 h) observa-se uma predominância do fluxo de CO<sub>2</sub> para a atmosfera em decorrência das emissões do solo e da respiração foliar, demonstrando que nesse período o ecossistema atua como potencial fonte de CO<sub>2</sub>, com maior potencial visto que nesse período a presença das folhas na vegetação (IAF  $\sim 3,49 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ) é mais elevada. Todavia, em termos médios diários, pode-se constatar que a presença de água no ecossistema promoveu relação entre a disponibilidade energética e o incremento líquido, que culminaram no crescimento das espécies do ecossistema.

Yang et al. (2011), em trabalho realizado em ecossistema estepe temperada no deserto da Mongolia na China, também constataram o crescimento da vegetação em condições de disponibilidade hídrica, demonstrando a capacidade destas de responder de forma rápida aos estímulos ocasionados pela variação ambiental.

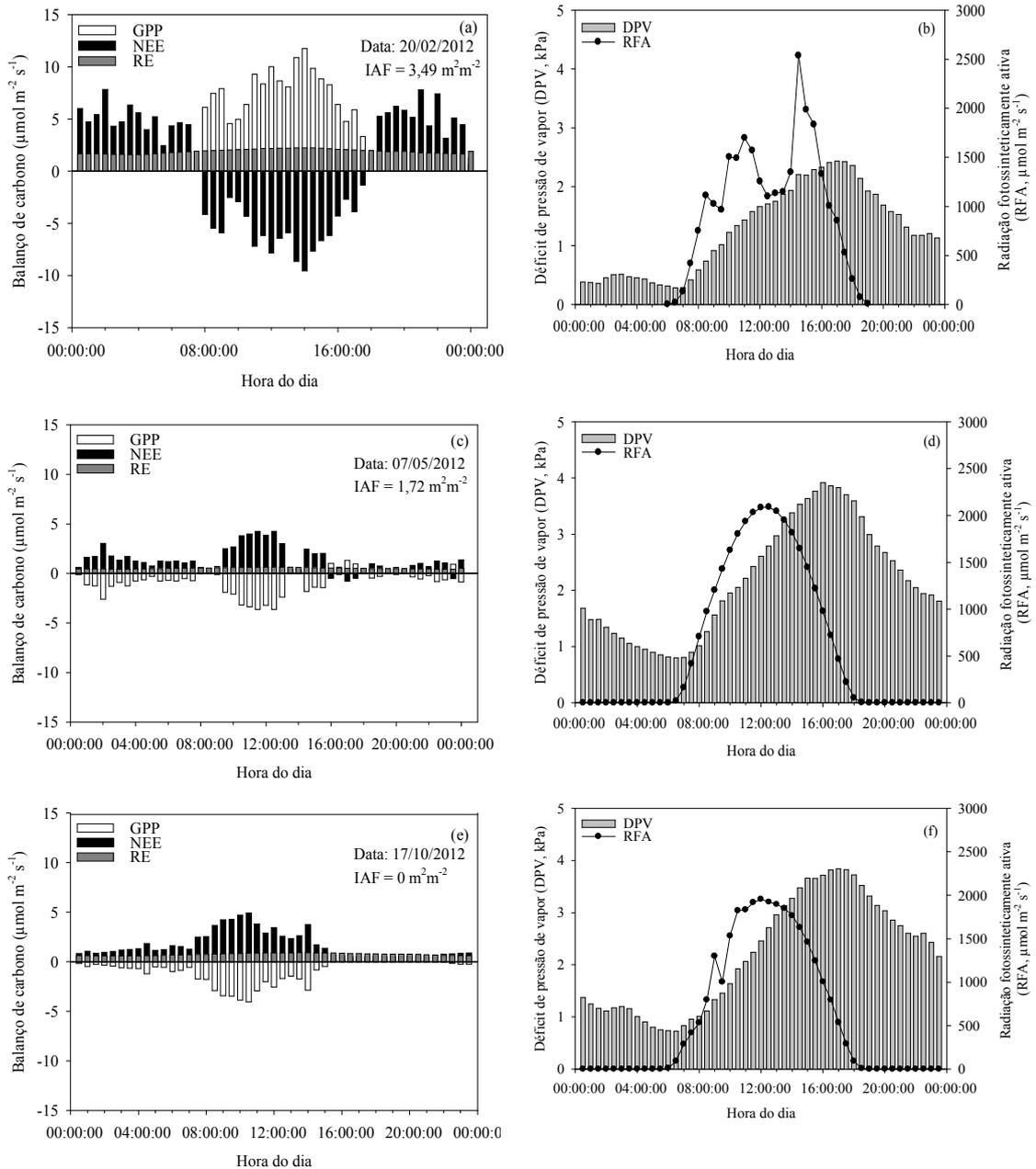


Figura 5 - Variação horária das partições do balanço de carbono (a, c e e), fluxo de carbono líquido (NEE), produção primária bruta (PPB) e respiração do ecossistema (Re), e dos elementos meteorológicos radiação fotossinteticamente ativa e déficit de pressão de vapor (b, d e f), em dias representativos para o período de disponibilidade hídrica, senescência e seco em uma área de Caatinga, durante um ano seco, Petrolina-PE.

Na medida em que a disponibilidade hídrica no sistema torna-se mais reduzida, tem-se o início do processo de senescência foliar (Figura 5c) ( $IAF \sim 1,17 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ). Nesse estágio, é promovida inversão no comportamento diário dos componentes do balanço de  $\text{CO}_2$  anteriormente relatado. Sob essa condição, o ecossistema atuou, predominantemente, como emissor deste gás para o ambiente. Os maiores valores do NEE foram observados no período entre 9h até às 13h, em torno de  $4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Posteriormente, com o aumento da temperatura do ar e do déficit de pressão de vapor observou-se forte redução dos valores do NEE ( $\sim 1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), atingindo valores quase nulos no período noturno, o que está associado à redução significativa da biomassa foliar, e conseqüentemente, à respiração autotrófica e do solo, ocasionada pela redução disponibilidade hídrica.

Na estação seca (17/10/2012), por outro lado, embora a magnitude dos valores do NEE tenham sido bastante próximos ao do período de senescência, observa-se que há um deslocamento da liberação do dióxido de carbono para o período compreendido entre 7h e 14h, com valores máximos iguais à  $3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura 5e). Nesta situação a quase totalidade dos fluxos líquidos ficam limitados aos horários anteriormente mencionados, de tal modo que no período noturno a liberação de  $\text{CO}_2$  é praticamente nula. Além disso, a PPB ( $\sim 2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) apresenta valores negativos durante todo o dia, o que indica que parte do  $\text{CO}_2$  presente no ecossistema estava sendo consumido para manter a vegetação.

Essa redução pode estar associada ao fato de que neste período houve combinação do aumento da temperatura, em decorrência da mudança nas estações do ano, e a ausência de precipitação que por sua vez culminaram na redução do efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo, que se concentrou nas horas de menor demanda atmosférica, como um mecanismo de adaptação da vegetação, para evitar maiores perdas deste gás para o ambiente.

#### **4. CONCLUSÕES**

A assimilação de dióxido de Carbono (NEE) e seus componentes, produtividade primária bruta (PPB) e respiração do ecossistema (Re) estiveram condicionados à ocorrência de precipitação na Caatinga;

Pulsos de precipitação baixa durante a estação seca culminaram em picos de NEE, com conseqüente liberação de  $\text{CO}_2$  para atmosfera;

A componente respiração do ecossistema (Re) predominou neste período com média diária de  $1,1 \text{ gC m}^2 \text{ d}^{-1}$  e os valores da produtividade primária bruta (PPB) foram praticamente nulos, indicando uma ausência do crescimento do ecossistema nesse período e utilização de  $\text{CO}_2$  para manutenção das espécies.

Durante o ano seco a Caatinga atuou como fonte de  $\text{CO}_2$  para atmosfera, com uma emissão igual a  $468,18 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ .

## 5. REFERÊNCIAS

AIRES, L. M. I.; PIO, C. A.; PEREIRA, J. S. Carbon dioxide exchange above a Mediterranean C3/C4 grassland during two climatologically contrasting years. **Global Change Biology**. v.14, p.539-555, 2008.

CHEN, W.; WOLF, B.; ZHENG, X.; YAO, Z.; BUTTERBACH-BALH, K.; BRUGGEMANN, N.; HAN, S.; LIU, C.; HAN, X. Carbon dioxide emission from temperate semiarid steppe during the non-growing season. **Atmospheric Environment**. v.64, p.141-149, 2013.

CIAIS, P.; REICHSTEIN, M.; VIOVY, N.; GRANIER, A.; OGEE, J. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. **Nature**. v.437, p.529-533, 2005.

DESAI, A. R.; RICHARDSON, A. D.; MOFFAT, A.M.; KATTGE, J.; HOLLINGER, D.Y.; BARR, A.; FALGE, E.; NOORMETS, A.; PAPALE, D.; REICHSTEIN, M.; STAUCH, V.J. Cross-site evaluation of eddy covariance GPP and RE decomposition techniques. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 148, p. 821-838, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FALGE, E; BALDOCCHI, D; OLSON, R; ANTHONI, P; AUBINET, M; BERNHOFER, C; BURBA, G; CEULEMANS, R; CLEMENT, R; DOLMAN, H; GRANIER, A; GROSS, P; GRUNWALD, T; HOLLINGER, D; JENSEN, NO; KATUL, G; KERONEN, P; KOWALSKI, A; LAI, C. T; LAW, B. E; MEYERS, T; MONCRIEFF, H; MOORS, E; MUNGER, J. W; PILEGAARD, K; RANNIK, U; REBMANN, C; SUYKER, A; TENHUNEN, J; TU, K; VERMA, S; VESALA, T; WILSON, K & WOFSY. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, vol 107, no. 1, pp. 43-69, 2001.

FENG, X.; LIU, G.; CHEN, J. M.; LIU, J.; JU, W. M.; SUN, R.; ZHOU, W. Net primary productivity of Chinas terrestrial ecosystems from process model driven by remote sensing. **Journal of Environment Management**, v. 85, n. 3, p. 563-573, 2007.

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

GILMANOV, T.G.; SOUSSANA, J.F.; AIRES, L.; ALLARD, V.; AMMAN, C.; BALZAROLO, M.; BARCZA, Z.; BERNHOFER, C.; CAMPBELL, C.L.; CERNUSCA, L.; CESCATTI, A.; CLIFTIN-BROW, J.; DIRKS, B.O.M.; DORE, S.; EUGESTER, W.; FUHRER, J.; GIMENO, C.; GRUENWALD, T.; HASZPRA, L.; HENSEN, A.; IBROM, A.; JACOBS, A.F.G.; JONES, M.B.; LANIGAN, G.; LAURILA, T.; LOHILA, A.; MANCA, G.; MARCOLLA, B.; NAGY, Z.; PILEGAARD, K.; PINTER, K.; PIO, C.; RASCHI, A.; ROGIERS, N.; SANZ, N.J.; STEFANI, P.; SUTTON, M.; TUBA, Z.; VALENTINI, R.; WILLIAMS, M.L.; WOHLFAHRT, G. Partitioning European grassland net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function. **Agriculture Ecosystems and Environment**. v.121, p.90-120, 2007.

HUNSAKER, D.J.; KIMBALLA, B.A.; PINTER JR., P.J.; WALL, G.W.; LAMORTEA, R.L.; ADAMSENA, F.J.; LEAVITT, S.W.; THOMPSON, T.L.; MATTHIAS, A.D.; BROOK, T.J. CO<sub>2</sub> enrichment and soil nitrogen effects on wheat evapotranspiration and water use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.104, p.85–105, .2000.

HUNT, J.E.; KELLIHER, F.M.; McSEVENY, T.M.; BYERS, J.N. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and tussock grassland during summer drought. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 111, p. 65-82, 2002.

JARVIS, P.G.; PETSİKOS, C.; WINGATE, L.; RAYMENT, M.; PEREIRA, J.S.; BANZA, J.; DAVID, J.S.; MIGLIETTA, F.; BORGETTI, M.; MANCA, G.; VALENTINI, R. Drying and wetting of soil simulates decomposition and carbon dioxide emission: the “Birch Effect”. **Tree Physiology**. v.27, p.929-940, 2007.

LI, S.G, ASANUMA, J.; EUGSTER, W.; KOTANI, A.; LIU, J.J. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. **Global Change Biology**. v.11, p.1941–1955, 2005.

OLIVEIRA, M. B. L. ; SANTOS, A. J. B. ; MANZI, A. O.; CORREIA, M. F. ; MOURA, M. S. B. . Análises das trocas de energia, radiação e de carbono no semi-árido nordestino. **Ciência e Natura**, v. Especial, p. 55-58, 2005.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, 166-174, 2006.

REICHSTEIN, M.; FALGE, E.; BALDOCCHI, D. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1424-1439, 2005.

SANTOS, S. A.; CORREIA, M. F.; ARAGÃO, M. R. S.; OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, E. P. Análise das trocas de água, energia e CO<sub>2</sub> em área de Caatinga: período úmido. **Ciência e Natura**. v. Especial, p 147-150, 2011.

SUN, R.; CHEN, J.M.; ZHU, Q.; ZHOU, Y.; LIU, J.; LIU, S.; YAN, G.; TANG, S. Spatial distribution of net primary productivity and evapotranspiration in Changbaishan Natural Reserve, China, using Landsat ETM+ data. **Canadian Journal Remote Sensing**. v.30, n.5, p. 731-742, 2004.

SUYKER, A. E.; VERMA, SB.; BURBA, G. G. Interannual variability in net CO<sub>2</sub> exchange of a native tallgrass prairie. **Global Change Biology**. v.9, p.255-265, 2003.

TRUMPER, K. RAVILIOUS, C. DICKSON, B. **Carbon in Drylands: Desertification, Climate Change and Carbon Finance**. A UNEP-UNDP-UNCCD Technical Note for Discussions at CRIC 7, Istanbul, Turkey - 03-14 November, 2008.

VICKERS, D.; IRVINE, J.; MARTIN, J. G.; LAW, B. E. Nocturnal subcanopy flow regimes and missing carbon dioxide. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 152, p. 101-108, 2011.

WU, J.; BROOKS, P.C. The proportional mineralization of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grassland soil. **Soil Biology & Biochemistry**. v.37, p. 507-515, 2005.

XU, I. K.; BALDOCCHI, D. D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.123, p. 129-132, 2004.

YANG, F.; ZHOU, G.; HUNT, J. E.; ZHANG, F. Biophysical regulation of net ecosystem carbon dioxide exchange over a temperate desert steppe in Inner Mongolia, China. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v. 142, p.318-328, 2011.

ZHAO, L.; LI, Y. N.; XU, S. X.; ZHOU, H. K.; GU, S.; YU, G. R.; ZHAO, X. Q. Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan plateau. **Global Change Biology**. v.12, p.1940-1953, 2006.

## CAPÍTULO 4

### TROCAS GASOSAS FOLIARES DIÁRIAS DE ESPÉCIES NATIVAS DA CAATINGA EM DIFERENTES ÉPOCAS DO ANO

**RESUMO:** Esse estudo objetivou analisar o comportamento das variações diurnas das trocas gasosas de espécies da Caatinga em diferentes épocas na região do Submédio Vale do São Francisco. Foram realizadas avaliações de assimilação do dióxido de carbono, transpiração, condutância estomática e eficiência do uso da água em cinco espécies predominantes em uma área de Caatinga hiperxerófila preservada do Campo Experimental da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE, Brasil. São elas: *Poincianella microphylla*, *Croton conduplicatus*, *Bauhinia cheilantha*, *Manihot pseudoglaziovii*, *Commiphora leptophloeos*. As campanhas ocorreram em quatro datas, sendo duas caracterizadas pela disponibilidade hídrica no sistema (medidas em 21/03/2012 e 04/02/2013); e outras duas durante períodos de déficit hídrico moderado e severo (medidas de 24/03/2012 e 13/04/2012, respectivamente). Independentemente da disponibilidade hídrica no sistema, a assimilação líquida fotossintética de CO<sub>2</sub> foi favorecida nos primeiros horários da manhã em todas as espécies. Com o progresso da deficiência hídrica em função do estabelecimento da estação seca, a eficiência de uso da água (EUA) foi otimizada. O déficit hídrico severo restringiu drasticamente a assimilação de todas as espécies. No entanto, as espécies *P. microphylla* e *B. cheilantha* conseguiram manter o balanço positivo de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, maiores valores de EUA, enquanto as demais espécies já apresentavam assimilação abaixo do ponto de compensação fotossintética nesta condição. Os resultados revelaram alta sensibilidade estomática das espécies estudadas às condições atmosféricas independentemente da disponibilidade hídrica.

**Palavras-chave:** ecofisiologia, fotossíntese, déficit hídrico, Semiárido.

**ABSTRACT:** This study aimed to analyze the behavior of diurnal variations of gas exchange of Caatinga species at different times in the lower-middle São Francisco Valley region. Evaluations were carried out carbon dioxide assimilation, transpiration, stomatal conductance and water use efficiency in five predominant species in a Caatinga area hyperxerophilic preserved the experimental field of Embrapa Semi-arid, Petrolina, Brazil. They are: *Poincianella microphylla*, *Croton conduplicatus*, *Bauhinia cheilantha*, *Manihot pseudoglaziovii*, *Commiphora leptophloeos*. The campaigns occurred in four dates, two characterized by water availability in the system (measured in 21/03/2012 and 02/04/2013); and two during periods of moderate drought and severe (measures 24/03/2012 and 13/04/2012 respectively). Regardless of water availability in the system, photosynthetic net co<sub>2</sub> assimilation was favored in the early hours of the morning in all species. With the progress of water stress due to the establishment of the dry season, water use efficiency (WUE) was optimized. Severe drought has severely curtailed the assimilation of all species. However, the species *P. microphylla* and *B. cheilantha* able to maintain a positive balance of CO<sub>2</sub> and hence larger us values, while the other species already presented photosynthetic assimilation below the compensation point in this condition. The results revealed high sensitivity stomatal of the species studied to weather conditions regardless of water availability.

**Keywords:** ecophysiological, photosynthesis, water stress, semiarid.

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre os biomas brasileiros, a vegetação da Caatinga é normalmente aquela considerada como a mais resistente à seca, o que se deve a sua composição de espécies que apresentam formas de vida “especializadas” com capacidade de se desenvolver em ambiente semiárido. O clima desta região é caracterizado segundo Moura et al. (2007) por períodos prolongados de seca, e algumas características específicas dos elementos meteorológicos, tais como: temperatura alta, umidade relativa baixa, precipitação pluvial inferior a 800 mm anuais e insolação média de 2800 h ano<sup>-1</sup>. A combinação destes elementos resulta em taxas evapotranspiratórias elevadas e na ocorrência de déficit hídrico, submetendo as espécies vegetais da região a condições frequentemente restritas de crescimento (TROVÃO et al., 2007).

A vegetação da Caatinga caracteriza-se por apresentar xeromorfismo e deciduidade (CASTELETTI et al., 2004), além de uma série de ajustes fisiológicos que lhes conferem notável capacidade de resistência à seca e altas temperaturas. Estes aspectos ainda são pouco estudados e representam algumas das questões mais intrigantes e desafiadoras para o aprofundamento do conhecimento sobre a capacidade de crescimento e sobrevivência de suas espécies sob condições naturais de campo (TROVÃO et al., 2007).

A fotossíntese é um dos principais processos afetados por temperaturas altas e pela deficiência hídrica com consequências diretas sobre o crescimento vegetal (JOHARI-PIREIVATLOU et al., 2010). Neste caso, pode haver limitações no balanço positivo de carbono, em função de aumento das taxas respiratórias, até a ocorrência de desnaturação proteica em situações mais extremas. Sob condição de deficiência hídrica, o fechamento estomático limita a perda transpiratória de água ao mesmo tempo em que impede a difusão do dióxido de carbono para o interior da folha, diminuindo assim sua concentração no entorno dos sítios de carboxilação (YU et al., 2009; LAWOR & TEZARA, 2009; GUO et al., 2010). Consequentemente, são observadas reduções nas taxas de fotossíntese líquida e de transpiração sob condições de restrição hídrica ou mesmo em ambiente onde a demanda evaporativa é muito elevada (ENDRES, 2010; HESSINI et al., 2009; SANTOS et al. 2013).

A maior parte dos estudos de trocas gasosas foliares ao longo do dia e das estações do ano em biomas brasileiros foi conduzida, principalmente, com espécies do Cerrado (DALMAGRO et al., 2011; PALHARES et al., 2010; PRADO et al., 2004).

Esses estudos mostram que pode haver diferenças de resposta entre espécies, mas, em geral, são observadas diminuições mais acentuadas das trocas gasosas ao longo do dia na estação seca (MORAES e PRADO, 1998; FRANCO, 1998). Reduções das trocas gasosas estão associadas, principalmente, ao déficit de pressão de vapor do ar regido pela temperatura, ao passo que variações sazonais são determinadas pela disponibilidade de água na camada do solo alcançada pelas raízes, cuja capacidade de aprofundamento depende de cada espécie.

Em regiões Semiáridas, a disponibilidade hídrica e o regime de temperatura tende a ser bastante variável tanto em termos diários quanto sazonais, visto que todo o suprimento hídrico natural de seus ecossistemas é oriundo de baixos volumes pluviométricos. A fotossíntese, transpiração, condutância estomática e eficiência do uso da água compreendem parâmetros ecofisiológicos importantes para a caracterização do comportamento das espécies em função de variações nas condições do ambiente (CATONI; GRATANI, 2014; SANTOS et al., 2013), podendo ser utilizadas para se aprofundar o conhecimento sobre os fatores que influenciam no balanço de carbono do bioma, sobre a resistência à seca de diferentes espécies, além de possibilitar a seleção de espécies mais adequadas para utilização em programas de reflorestamento ou sistemas de manejo agroflorestais. Desta forma, esse trabalho objetivou avaliar variações diárias das trocas gasosas foliares de cinco espécies nativas da Caatinga em diferentes épocas do ano na região do Submédio Vale do São Francisco.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Localização e caracterização da área experimental**

O trabalho foi realizado em uma área com Caatinga localizada na Embrapa Semiárido (9°05'S; 40°19' W; 350m), município de Petrolina, PE. O clima da região, segundo Köppen, é classificado como BSw<sup>h</sup>, 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 uma extensão total de aproximadamente 600 ha, composta por vegetação hiperxerófila de porte arbóreo-arbustivo (com altura média de aproximadamente 5 metros). Na qual foram estudadas cinco das espécies: *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.

## 2.2. Trocas gasosas

As taxas de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), transpiração (E,  $\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $g_s$ ,  $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e temperatura foliar (°C) foram medidas utilizando um analisador de gás por infravermelho (LI-6400, LI-COR, USA), atuando na concentração de CO<sub>2</sub> ambiente. Anteriormente à realização de cada medida, o valor da densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) incidente na superfície foliar, a partir da radiação solar, foi medido sob condição de céu claro, sem nuvens no momento da medida, e posteriormente fixado para a realização das leituras. As leituras foram realizadas utilizando-se uma câmara com amostragem de área foliar de 2 cm<sup>2</sup> (LCF, leaf chamber fluorometer). Para a espécie *P. microphylla*, que apresenta folha composta por folíolos menores do que a área total da câmara, a área foliar amostrada foi corrigida para 0,55 cm<sup>2</sup> anteriormente à realização de cada medida. Esse valor foi obtido a partir da área média ocupada por tecidos foliolares e peciolares em uma área de 2 cm<sup>2</sup> de 20 folhas adultas completamente expandidas de dez indivíduos diferentes da população de estudo. Para as demais espécies, a área amostrada cobriu toda a área de 2 cm<sup>2</sup> da câmara utilizada.

As avaliações foram realizadas em quatro períodos distintos, sendo três durante o primeiro semestre de 2012 (aos quatro, sete e vinte e sete dias depois de um evento de chuva de 22 mm – DAC, 21/03/2012, 24/03/2012 e 13/04/2012, respectivamente), e a quarta avaliação foi no primeiro semestre de 2013 (medidas de 04/02/2013). Os mesmos indivíduos de cada espécie foram utilizados para as avaliações nas diferentes datas do ano.

Para as medidas do primeiro semestre de 2012 observou-se que, devido ao baixo volume de precipitação ocorrido no início daquele ano, a cobertura foliar presente na Caatinga ainda era decorrente das chuvas ocorridas no final de 2011, ou seja, compostas por folhas mais velhas com aproximadamente 4 meses de idade, e que já haviam passado por determinado período de deficiência hídrica. Para as medidas do primeiro semestre de 2013, observou-se que as folhas utilizadas para as avaliações correspondiam a folhas recentemente expandidas, resultantes da recuperação da biomassa foliar decorrente de um evento de precipitação de 66 mm após o estado de

completa ausência de folhas na vegetação. Neste caso, as folhas amostradas para as avaliações apresentavam idade de aproximadamente um mês.

As avaliações de trocas gasosas foram realizadas ao longo do dia, das 8h:30 às 16h:30h para a primeira e quarta datas, e das 7h:30 às 16h:30 para as demais (segunda e terceira), em intervalos de aproximadamente duas horas e meia entre as leituras. Para cada espécie foram realizadas medidas em três indivíduos, nos quais foram amostradas as folhas mais novas completamente expandidas, localizadas no terço médio das plantas, com superfícies orientadas perpendicularmente para a radiação solar direta no momento das leituras.

A partir dos dados de trocas gasosas foi calculada a eficiência do uso da água (EUA, A/E) de acordo com Larcher (2006) e a eficiência intrínseca do uso da água (IEUA, A/g<sub>s</sub>).

Os valores de “A” determinados durante o curso diário foram integrados de acordo com Souza et al. (2008) e Kikusawa et al. (2004) para obtenção dos totais diurnos, utilizando a equação que segue:

$$A(y) = \int_0^y A \, dx \quad (1)$$

em que x é a variável independente (tempo em intervalo de segundos ao longo do curso diário); A(y) é o valor integrado, e A é a variável dependente (fotossíntese).

### **2.3. Determinação do índice de área foliar**

O índice de área foliar (IAF) foi determinado em intervalos médios de 15 dias, ao longo de todo o ano de 2012 e primeiro trimestre de 2013. Foi utilizado o Ceptômetro AccuPar (Decagon Devices Inc, 2001), que estima o IAF em função da interceptação luminosa pelo dossel. Com a finalidade de garantir a precisão das leituras, as medidas foram realizadas em horários sempre próximos ao meio dia local, em três direções: nordeste, noroeste e sudeste, sendo efetuadas doze leituras em cada direção, totalizando 36 repetições por campanha de medição.

## **2.4. Monitoramento do conteúdo de água no solo**

Para determinação do conteúdo de água no solo foram realizadas campanhas em intervalos médios mensais no período seco, ou logo após a ocorrência de eventos de chuva. Foi utilizado um trado de ferro para obtenção de amostras de solo na camada de 0-0,10; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50m. As amostras de solo coletadas foram acondicionadas em latas de alumínio e vedadas com fita crepe para evitar perda de água para o ambiente durante o transporte para o laboratório de solos da Embrapa Semiárido, onde foram pesadas para obtenção do peso úmido e, logo em seguida colocadas em estufa a 100°C para obtenção do peso seco após um intervalo de 48h. Foi determinada a porcentagem de água no solo que, em seguida, foi relacionada à densidade do solo para a determinação do conteúdo de água no solo ( $m^3m^{-3}$ ).

## **2.5. Curso diário das condições microclimáticas e da evapotranspiração**

O monitoramento das condições meteorológicas nas diferentes datas de avaliações foi realizado a partir de uma torre micrometeorológica, localizada no centro da área experimental de Caatinga, com altura de 16 metros que estava equipada com um sistema de aquisição de dados *datalogger* (modelo CR1000, Campbell Scientific, Inc.) ao qual estavam ligados sensores para o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar global, radiação fotossinteticamente ativa e precipitação pluvial. Adicionalmente, foi realizado o monitorado por meio de um sistema de alta frequência, composto de um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3, Campbell Scientific, Logan, UT, EUA) e de um analisador de gás por infravermelho de caminho aberto (LI-7500, Licor, Lincoln, NE, EUA) para determinação do fluxo de vapor d'água sobre o ecossistema, o qual foi posteriormente convertido em valores de evapotranspiração da Caatinga para os dias específicos de realização das campanhas em campo.

## **2.6. Análise estatística**

Os resultados foram submetidos à análise com uso de estatística descritiva, na qual foram analisados valores médios, desvio padrão e erro padrão; que resultaram nas tendências de comportamento das variáveis durante o experimento. Para comparação

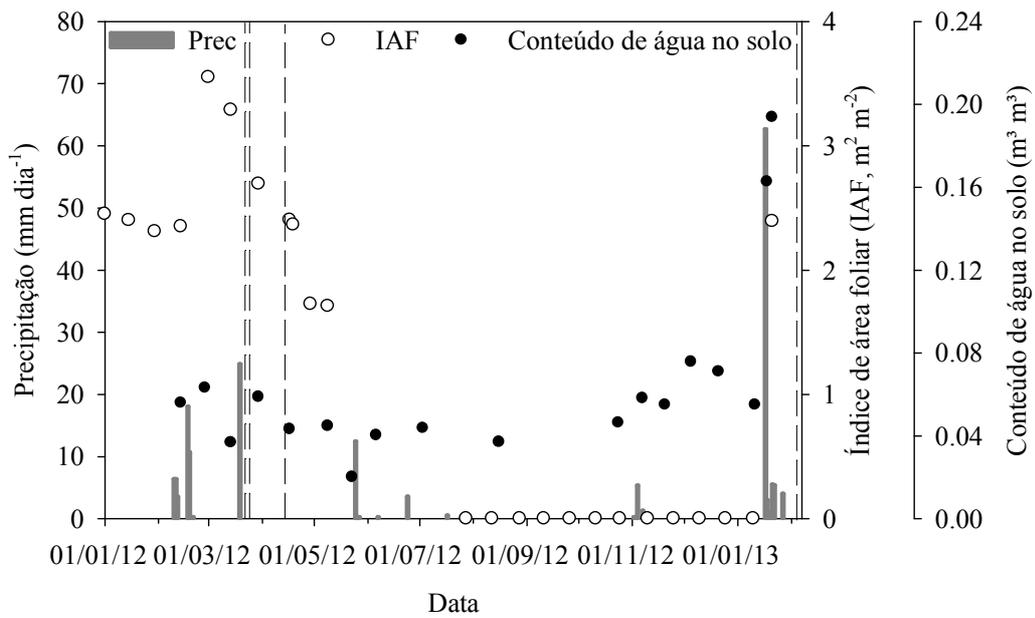
das médias, adotou-se o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, por meio da utilização do *software* SISVAR.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

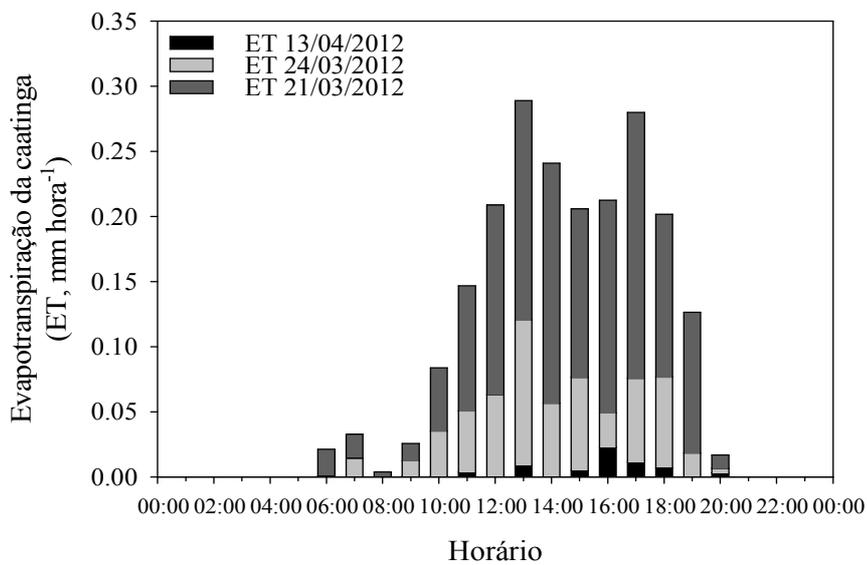
#### **3.1. Disponibilidade hídrica do ecossistema e variação diurna dos elementos meteorológicos**

O ano de 2012 apresentou-se bastante seco, como resultado da ocorrência do fenômeno Dipolo do Atlântico, com temperaturas muito positivas na Bacia do Atlântico Norte, que afetaram o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical e, conseqüentemente, a qualidade da estação chuvosa na Região Nordeste (CPTEC, 2012). Foi então registrada a precipitação acumulada de apenas 92,24 mm ano<sup>-1</sup>, cujo volume esteve concentrado principalmente em quatro dias do ano (cerca de 70% da precipitação pluvial total). Esse valor foi bastante inferior ao da normal climatológica da região que é de 510 mm anuais (EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2013).

Em regiões semiáridas, a precipitação pluvial representa o fator chave que determina a disponibilidade de água no ecossistema, a qual é de fundamental importância em praticamente todos os processos ecológicos dentro do sistema, incluindo-se a produtividade líquida (SCHWINNING; EHLENRINGER, 2001; AUSTIN et al., 2004). Nesse contexto, o baixo volume de chuvas observado contribuiu para que a vegetação ficasse sujeita a um período de déficit hídrico antecipado e prolongado em relação aos anos considerados normais. Este fato refletiu de forma direta na cobertura de folhas, cuja queda teve início no mês de abril resultando em valores mínimos do índice de área foliar (IAF), da ordem de 0 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> próximos do mês de agosto (correspondente apenas à presença de caules e ramos), quando todas as espécies já se apresentavam totalmente sem folhas. Esse comportamento permaneceu até o final de janeiro de 2013 quando em decorrência de uma chuva de 66 mm, a vegetação emitiu novas folhas, elevando o IAF a 2,4 m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup> (Figura 1a).



(a)



(b)

Figura 1 - Comportamento da precipitação pluvial e do índice de área foliar (a) e evapotranspiração horária da vegetação de Caatinga (b), durante o período do experimento na Embrapa Semiárido, Petrolina, PE.

Conforme observado, o conteúdo de água no solo permaneceu baixo durante todo o ano de 2012, apresentando os valores de 0,07; 0,05 e 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> na primeira (21/03/2012), segunda (24/03/2012) e terceira (13/04/2012) data de avaliação, nesta ordem, e de 0,19 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> na quarta data de avaliação (04/02/2013).

O comportamento médio das variáveis meteorológicas (temperatura do ar, Tar; umidade relativa, UR; radiação solar global, Qg; radiação fotossinteticamente ativa, RFA, e déficit de pressão de vapor, DPV) nos dias de realização das medições fisiológicas são apresentados na Figura 2. Para as três primeiras datas analisadas o comportamento dos elementos meteorológicos foram bastante semelhantes, com valores médios de temperatura do ar (Tar) em torno de  $27,4 \pm 0,32^{\circ}\text{C}$ , enquanto a UR foi de aproximadamente  $47 \pm 2,45\%$ . Estes valores resultaram em déficit de pressão de vapor cuja média diária foi de  $2,0 \pm 0,1$  kPa, atingindo valores máximos próximo ao fim da tarde ( $3,94 \pm 0,06$  kPa) e mínimos de 0,65 kPa em períodos próximos ao nascer do sol. Adicionalmente, observou-se neste período alta incidência de radiação solar, em média  $23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , que contribuiu para o aumento da demanda atmosférica.

Na quarta data analisada (04/02/2013) houve pequeno incremento na Tar e UR, que resultaram em um DPV médio diário de 2,15 kPa. A radiação solar global, por sua vez, mostrou-se ligeiramente superior às datas anteriores, com média diária de  $25 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ .

Como resultado das condições meteorológicas do sistema, observou-se também o incremento da evapotranspiração da Caatinga de  $0,3 \text{ mm d}^{-1}$ , em 18 de março, para  $1,35 \text{ mm d}^{-1}$ , no dia 20 do referido mês, ou seja, um dia após o evento de precipitação. Quando se analisaram as datas nas quais foram realizadas as medições fisiológicas, observou-se que na primeira data (21/03/2012) a vegetação ainda mantinha a ET de  $1,3 \text{ mm d}^{-1}$ , indicando que neste período havia maior oferta de água, sendo que a maior parte desta água foi consumida especialmente no período de maior demanda atmosférica, entre 12-16h (Figura 1b). Posteriormente, houve redução da ET nos dias 21/03 e 13/04 de 43% e 2,87% do valor obtido na primeira data, respectivamente.

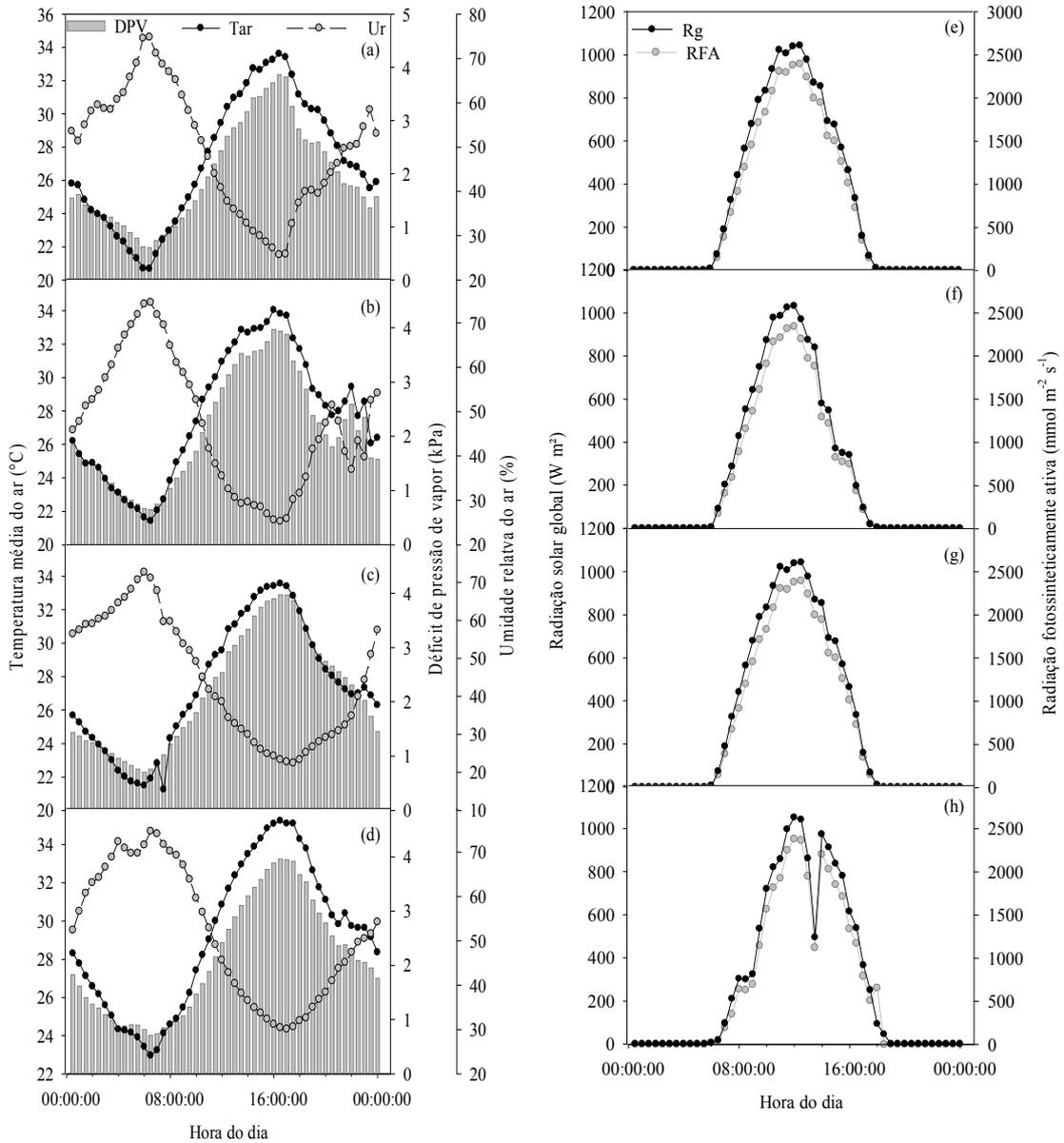


Figura 2 - Comportamento horário das variáveis meteorológicas da vegetação de Caatinga nas diferentes datas de avaliações: (a, e) 21/03/2012, (b, f) 24/03/2012, (c, g) 13/04/2012, e (d, h) 04/02/2013, na Embrapa Semiárido, Petrolina, PE.

### 3.2. Variação diurna e sazonal das trocas gasosas

Na Figura 3 é apresentado o comportamento dos parâmetros fisiológicos para as cinco espécies nos diferentes períodos analisados. Observa-se que dentre as condições ambientais, a disponibilidade de água exerceu forte influência sobre as trocas gasosas das diferentes espécies em todo o período. Nos períodos de maior disponibilidade de água, em decorrência da proximidade com o evento de precipitação, verificou-se que as espécies apresentaram valores totais diários da fotossíntese líquida entre 0,22 e 0,40 mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Neste caso, no dia 21/03/2012 as espécies *P. microphylla* e *M. pseudoglaziovii* se destacaram sendo significativamente diferentes das demais principalmente no primeiro horário, quando apresentaram as maiores taxas fotossintéticas do dia, os quais foram de 12,8 e 13 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente, com total diário de 0,38 e 0,40 mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Por outro lado, as espécies *C. conduplicatus*, *B. cheilantha* e *C. leptophloeos* mantiveram as taxas de assimilação por período mais prolongado, com valores totais diários de 0,30; 0,26 e 0,22 mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, respectivamente.

Quando se analisou o curso diário de “A”, observou-se que os maiores valores ocorreram nas primeiras horas do dia (Figura 3a). O que está associado ao fato de que nestes horários as condições de menor déficit de pressão de vapor d’água no ar favoreceram o aumento da abertura estomática em conjunto com o aumento da incidência da radiação solar (Figura 3e) e, conseqüentemente no incremento da assimilação de gás carbônico.

Na medida em que se aproximaram os horários de maior déficit de pressão de vapor d’água no ar (14 às 16h), a fotossíntese (A) foi reduzida (Figura 2a e b). Mendes et al. (2013), ao analisarem a espécie decídua *Cordia oncocalyx*, também constataram a redução da “A” diante do aumento do déficit de pressão de vapor.

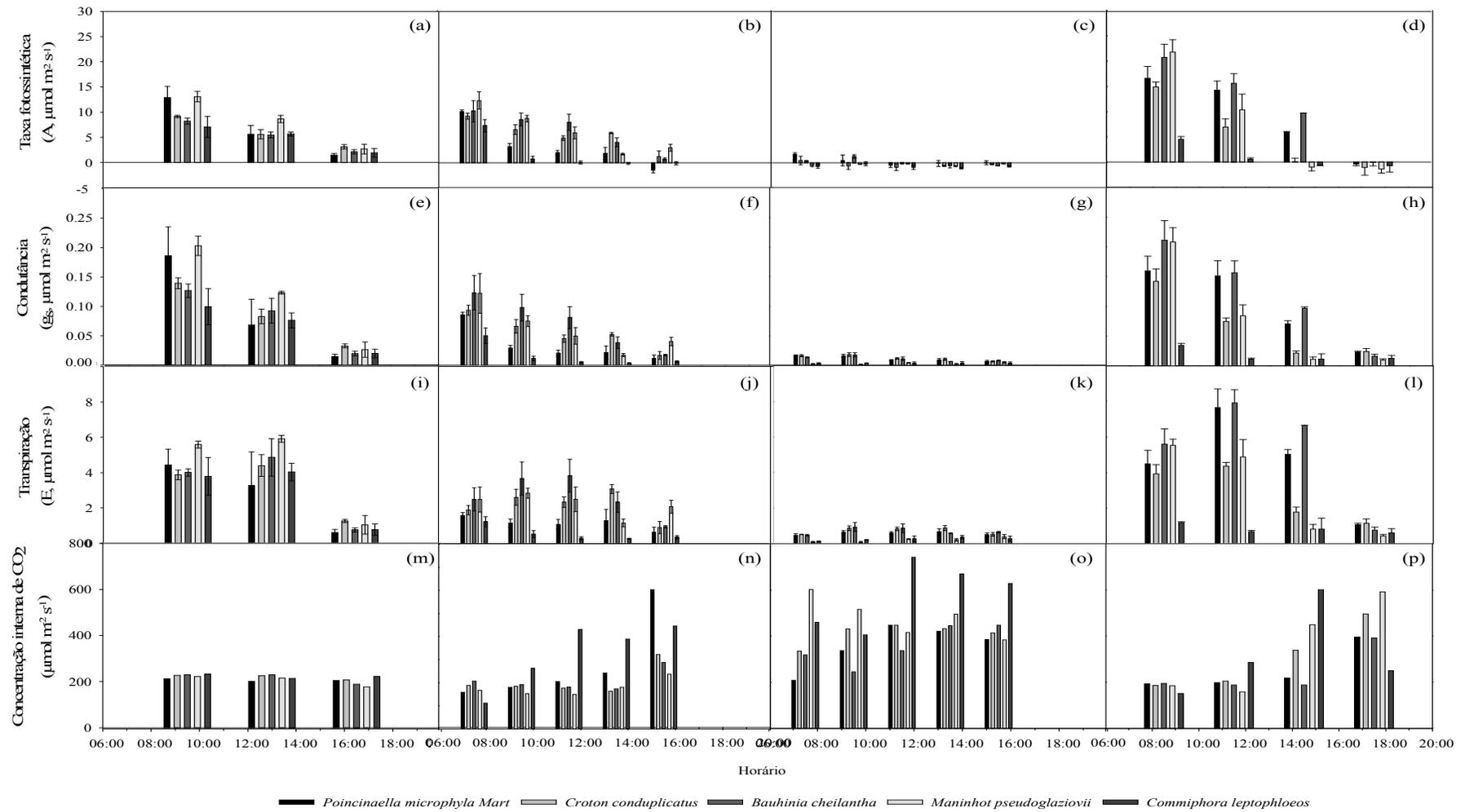


Figura 3 - Curso diário das trocas gasosas em cinco espécies da Caatinga em diferentes épocas do ano: 21/03/2012 (a, ee i), 24/03/2012 (b, f e j), 13/04/2012 (c, g e k) e 04/02/2013 (d, h e l), Embrapa Semiárido, Petrolina-PE.

Após as 16h, quando a demanda atmosférica tendeu a redução, não foi observada recuperação nos valores de “A”, por causa da redução dos níveis de radiação fotossinteticamente ativa. Comportamento similar foi observado no dia 24/03/2012, no qual a fotossíntese é mais alta nas primeiras horas da manhã, demonstrando a maior eficiência fotossintética dessas plantas nos primeiros horários do dia (Figura 2b). As maiores taxas fotossintéticas no período da manhã, em relação ao período da tarde, têm sido reportado em diversos trabalhos em que as plantas encontram-se sob déficit hídrico. Romero & Botía (2006) e Mendes et al. (2013) citam que sob essas condições ocorre uma maior economia de água.

*M. pseudoglaziovii* seguida da *P. microphylla* apresentaram os maiores valores de “gs” no início do dia na primeira e segunda datas (21/03/2012 e 24/03/2012), contribuindo para o aumento da perda de água por transpiração, bem como para o influxo de CO<sub>2</sub>, o que foi decisivo no comportamento das taxas fotossintéticas anteriormente mencionadas. As demais espécies, por sua vez, não apresentaram diferenças significativas de “gs” no primeiro horário da manhã. Nas horas mais quentes do dia (12 às 16h), foi observada diminuição de “gs” e, conseqüentemente, o aumento da resistência estomática (rs) das plantas analisadas. Aumento na “rs” em plantas da Caatinga durante os horários mais quentes do dia (12 às 16h) também foram relatados por Mansur e Barbosa (2000), Nogueira & Silva (2002) e Silva et al.(2004).

Em geral, a deficiência hídrica promove o incremento da resistência difusiva ao vapor d’água pelo fechamento estomático, reduzindo a transpiração e também o suprimento de CO<sub>2</sub> para fotossíntese (NOGUEIRA et al., 1998; SILVA et al., 2004). Nesse estudo, esse comportamento foi pronunciado na espécie *P. microphylla*, juntamente com a *C. leptophloeos* nas primeiras datas de avaliações (folhas mais velhas), indicando que essas espécies foram as que mais economizaram água dentre todas as analisadas. No entanto, este comportamento se inverteu para a espécie *P. microphylla* de acordo com os resultados da última data de avaliação (em folhas mais novas). Nesse último caso, sob condições de maior disponibilidade de água, essa espécie apresentou taxas de transpiração superior em relação às demais. Este comportamento tem como vantagem uma maior capacidade de absorção de nutrientes em consequência de maior transpiração, além de maiores taxas de assimilação fotossintética em decorrência do maior grau de abertura estomática. Este padrão de comportamento para a espécie ajuda a explicar a grande frequência relativa da mesma

tanto na área de estudo como em outras áreas de Caatinga, especialmente em áreas degradadas em fase de regeneração.

Na maioria das espécies, as taxas de transpiração mais elevadas ocorreram entre 12 e 14h para as duas primeiras datas analisadas (21/03/2012 e 24/03/2012), mesmo com leves reduções da condutância, em relação aos valores observados no início do dia. Tal comportamento se deve ao aumento do déficit de pressão de vapor que, inicialmente, promove o incremento da transpiração.

O aumento do DPV exerce influência determinante sobre o fechamento estomático, contudo, está bastante relacionado com a umidade do solo. Este controle segundo Streck (2003) pode ser mediado pela redução do potencial de água na folha, promovido pela transpiração excessiva, que resulta no fechamento estomático.

No dia 04/02/2013, por outro lado, os maiores valores de transpiração para todas as espécies apresentaram-se deslocados para os períodos próximos do meio dia. Com a seca progressiva do solo, a condutância estomática diminuiu levemente para a maioria das espécies, acompanhada da diminuição de  $C_i$  (concentração interna de  $CO_2$ ). Esta resposta está relacionada à maior resistência para a difusão do  $CO_2$  no interior da câmara subestomática em função da restrição da abertura estomática.

Logo, a diminuição da disponibilidade de  $CO_2$  para a carboxilação provoca a diminuição da taxa fotossintética. Posteriormente, quando a disponibilidade hídrica apresentou-se bastante reduzida na terceira data de avaliação, o balanço de  $CO_2$  aproximou-se de zero ou levemente negativo (Figura 3c) para todas as espécies e horários sob condutância estomática e transpiração praticamente nulas (Figura 3g e k).

O reduzido consumo de  $CO_2$  devido às baixas taxas fotossintéticas observadas em função dos horários mais quentes do dia e, em função da progressão do déficit hídrico, associado à continuidade da respiração, resultaram no incremento significativo da concentração interna de  $CO_2$  (Figura 3o). Resultados semelhantes também foram observados em estudos do crescimento de *Jatropha curcas* L. em áreas semiúmidas e semiáridas submetidas ao estress hídrico, bem como em algumas espécies de mecanismo C4 (MACHADO; LAGÔA, 1994; SANTOS et al., 2009).

O cessamento das trocas gasosas em todas as espécies na terceira data de avaliação, 26 dias após o evento de chuva de 24,9 mm, indica a disponibilidade de água reduzida nas camadas de solo exploradas pelas raízes das espécies analisadas. Importante ressaltar que os solos da região apresentam, frequentemente, a profundidade média de 1 m, o que os limitam para o armazenamento de água.

Após o período em que todas as plantas analisadas perderam completamente sua cobertura foliar, houve novo evento de chuvas com a emergência de folhas. Neste caso, as plantas apresentaram valores de “A” maiores quando comparados à primeira data, atingindo até  $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , com destaque para as espécies *B. cheilantha*, *P. microphylla* e *M. pseudoglaziovii*, que apresentaram totais de fotossíntese líquida durante o período diurno iguais a 0,59; 0,45 e 0,49 mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente.

O comportamento do curso diário dos demais parâmetros fisiológicos foi bastante similar aos observados nas duas primeiras datas analisadas. Entre as 12h e 14h foi verificada diminuição da condutância estomática da ordem de 46%, 28%, 61%, 12% e 0% para a *P. microphylla*, *C. conduplicatus*, *B. cheilantha*, *M. pseudoglaziovii*, *C. leptophloeos*, respectivamente. Este comportamento esteve associado ao aumento significativo de “Ci” exceto para a *P. microphylla* e *B. cheilantha*, as quais apresentaram incrementos deste parâmetro apenas no final do período diurno.

### **3.3. Eficiência do uso da água**

O aumento do déficit hídrico no sistema promoveu um leve incremento, da ordem de 10%, nos valores médios diários da eficiência do uso da água (EUA) e da eficiência intrínseca do uso da água (IEUA) (Figuras 4b e 4f) de *B. cheilantha*, *M. pseudoglaziovii* e *C. conduplicatus* quando comparados aos períodos de maior disponibilidade hídrica (Figuras 4a e 4e). Este comportamento é consistente com os observados por Gulías et al. (2002), que verificaram o incremento de A/gs em decorrência do estresse hídrico em espécies arbóreas nativas, no Mediterrâneo. Por outro lado, Prado et al. (2004), estudando diferentes espécies do Cerrado, verificaram que a EUA permaneceu praticamente inalterada, diminuindo de 2,1 para 2,0; da época úmida para a seca.

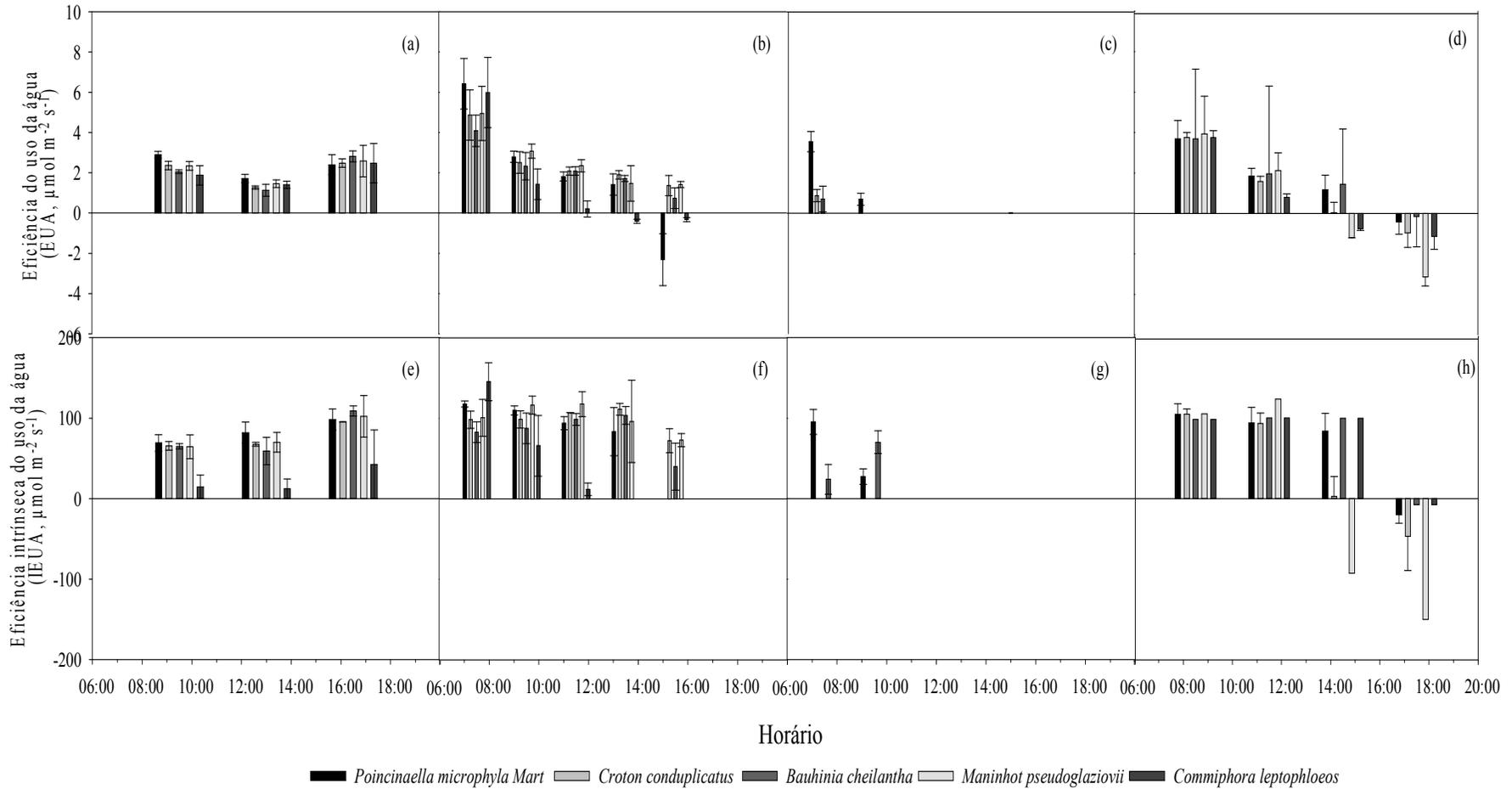


Figura 4 - Eficiência do uso da água (a, b, c e d) e eficiência intrínseca do uso da água (e, f, g e h) em cinco espécies da Caatinga em diferentes épocas do ano: 21/03/2012 (a e e), 24/03/2012 (b e f), 13/04/2012 (c e g) e 04/02/2013 (d e h), na Embrapa Semiárido, Petrolina-PE.

Com a diminuição progressiva da disponibilidade de água, o fechamento estomático ocasionou balanço negativo de CO<sub>2</sub>, além de anular a transpiração foliar para todas as espécies analisadas, resultando em valores nulos de EUA e IEUA (Figura 4c e g). Na primeira data, os maiores valores médios diários da EUA foram encontrados para a *P. microphylla* sendo iguais a 2,33 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>/mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>; e os menores para a *C. leptophloeos* os quais foram de 1,91 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>/mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>. Esses são superiores aos encontrados no outro período de disponibilidade hídrica (04/02/2013), os quais foram de 1,56 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>/mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> e 0,65 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>/mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, respectivamente.

Em todos os casos analisados, observou-se o deslocamento dos maiores valores de EUA e IEUA para períodos próximos ao amanhecer, em comparação com os resultados obtidos para o meio dia. Neste caso, as diferenças horárias observadas podem estar associadas às condições do ambiente, como por exemplo, as condições de menores valores de DPV no início da manhã.

No dia 24/03, sob condição de déficit hídrico, houve aumento da eficiência do uso da água nas horas mais amenas do dia, na ordem de 26%, 36%, 38%, 35% e 9% para as espécies *P. microphylla*, *C. conduplicatus*, *B. cheilantha*, *M. pseudoglaziovii*, e *C. leptophloeos*, respectivamente. Esses dados indicam que, quando a disponibilidade de água não é um fator limitante, a eficiência do uso da água nas espécies analisadas é menor. Isto é decorrente de taxas de transpiração relativamente maiores, mesmo em condições de alto DPV. Sob essas condições, as espécies mostraram-se mais eficazes na maximização de “A”.

#### 4. CONCLUSÕES

A disponibilidade hídrica foi determinante para a magnitude das taxas de transpiração e fotossíntese e sobre a eficiência do uso da água de todas as espécies analisadas.

A EUA é potencializada sob déficit hídrico, principalmente nos horários de início da manhã.

Sob condição de disponibilidade hídrica ocorre uma maximização da assimilação de CO<sub>2</sub> em detrimento a eficiência do uso da água, sendo a primeira sempre mais pronunciada no início da manhã.

As espécies *P. microphylla*, *C. conduplicatus*, *B. cheilantha*, e *M. pseudoglaziovii* apresentaram maior otimização do uso da água em função do horário do dia e das condições sazonais de disponibilidade hídrica.

Estas informações são de extrema importância em estudos de modelagem (calibração) da interação biosfera e atmosfera.

## 5. REFERÊNCIAS

AUSTIN, A. T.; YAHDJIAN, L.; JOHN, M.; STARK, J. M.; BELNAP, J.; PORPORATO, A.; NORTON, U.; RAVETTA, D. A.; SCHAEFFER, S. M. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. **Oecologia**, v. 141, n. 2, p. 221-235, 2004.

CASTELLETTI, C.H.M., J.M.C. SILVA, M. TABARELLI & A.M.M. SANTOS. Quanto ainda resta da Caatinga? Uma estimativa preliminar. In: J.M.C. Silva, M. Tabarelli, M.T. Fonseca & L.V. Lins (orgs.). Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação. pp. 91-100. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2004.

CATONI, R.; GRATANI, L. Variations in leaf respiration and photosynthesis ratio in response to air temperature and water availability among Mediterranean evergreen species. *Journal of Arid Environments*. v. 102, p. 82-88, 2014.

CPTEC. **Centro de Previsões de tempo e Estudos Climáticos**. <http://www.cptec.inpe.br> (accessado em: 03.09.2014)

DALMAGRO, J.H.; ALMEIDA LOBO, F.; ORTÍZ, C.E.R.; BIUDES, M.S.; NOGUEIRA, J.S.; VOURLITIS, G.L.; PINTO JUNIOR, O.B. Trocas gasosas de uma espécie Lenhosa na floresta de transição amazônia - cerrado. **Ciência e Natura**, v. 33, n. 2, p. 147-165, 2011.

EMBRAPA. **Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido**. Médias anuais da Estação Agrometeorológica de Bebedouro. Petrolina, 2013. Disponível em: <<http://www.cpatia.embrapa.br:8080/servicos/dadosmet/ceb-anual.html>>. Acesso em: 17. 08. 2014.

ENDRES, L.; SOUZA, J. L.; TEODORO, L.; MARROQUIM, P. M. G.; SANTOS, C. M.; BRITO, J. E. D. Gas exchange alteration caused by water deficit during the bean reproductive stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 11-16, 2010.

FRANCO, A.C. Seasonal patterns of gas exchange, water relations and growth of *Roupala montana*, an evergreen savanna species. **Plant Ecology**. v. 136, p. 69-76, 1998.

FRANCO, A.C.; LÜTTGE U. Midday depression in savanna trees: coordinated adjustments in photochemical efficiency, photorespiration, CO<sub>2</sub>, assimilation and water use efficiency. **Oecologia**, v. 131, p. 356-365, 2002.

GULIAS, J.; FLEXAS, J.; ABADÍA, A.; MEDRANO, H. Photosynthetic responses to water deficit in six Mediterranean sclerophyll species: possible factors explaining the declining distribution of *Rhamnus ludovici-salvatoris*, an endemic Balearic species. **Tree Physiology**, v. 22, p. 687-697, 2002.

GUO, X.Y. Guo.; ZHANGL, X.S.; HUANG, Z.Y. Drought tolerance in three hybrid poplar clones submitted to different watering regimes. **Journal of Plant Ecology**, v. 3, p. 79-87, 2010.

HESSINI, K.; MARTÍNEZ, J.P.; GANDOUR, M.; ALBOUCHI, A.; SOLTANI, A.; ABDELLEY, C. Effect of water stress on growth, osmotic adjustment, cell wall elasticity and water-use efficiency in *Spartina alterniflora*. **Environmental and Experimental Botany**, v. 67, p. 312-319, 2009.

JOHARI-PIREIVATLOU, M.; QASIMOV, H.; MARALIAN, H. Effect of soil water stress on yield and proline content of four wheat lines. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, p. 36-40, 2010.

KIKUSAWA, K.; SHIRSKAWA, H.; SUZUKI, M.; UMEKI, K. Mean labor time of a leaf. **Ecology Research**. v. 19, n. 4, p. 365-374, 2004.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2006. 550p

MACHADO, C.E. & LAGÔA, A.M.M.A. Trocas gasosas e condutância estomática em três espécies de gramíneas. **Bragantia**, v. 53, p. 141-149, 1994.

MANSUR, R. J.; BARBOSA, D. C. A. Comportamento fisiológico em plantas jovens de quatro espécies lenhosas da caatinga submetidas a dois ciclos de estresse hídrico. **Phyton**, Vicente López, v. 68, p. 97-106, 2000.

MENDES, M. M. de S.; LACERDA, C. F. de.; FERNANDES, F. E. P.; CAVALCANTE, A. C. R.; OLIVEIRA, T. S. de. Ecophysiology of deciduous plants grown at different densities in the semiarid region of Brazil. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, Campo dos Goytacazes, v. 25, n. 2, 2013.

MORAES, J. A. P. V.; PRADO, C. H. B. A. Photosynthesis and water relations in Cerrado vegetation. **Oecologia Brasiliens**. v. 4, p. 45-63, 1998.

MOURA, M. S. B. ; GALVÍNCIO, J. D. ; BRITO, L. T. de L.; SOUZA, L. S. B. de ; SÁ, I. I. S. ; SILVA, T. G. F. da . **Clima e água de chuva no Semi-Árido**. In: BRITO, L.T.L.; MOURA, M.S.B.; GAMA, G.F.B.. (Org.). *Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro*. 1 ed. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007, v. 1, p. 37-59.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; BARBOSA, D. C. A.; MORAES, J. A. P. V. Trocas gasosas e relações hídricas em plantas jovens envasadas de três espécies da caatinga, submetidas a deficiência de água. **Phyton**. Vicente López. v. 62, n. 1, p. 37-46, 1998.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; SILVA, E. C. da. Comportamento estomático em plantas jovens de *Schinopsis brasiliensis* Engl. cultivadas sob estresse hídrico. **Iheringia. Série Botânica**, Porto Alegre, v. 57, n. 1, p. 31-38, 2002.

PALHARES, D.; FRANCO, A.C.; ZAIDAN, L. B. P. Respostas fotossintéticas de plantas do cerrado nas estações seca e chuvosa. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 8, n. 2, p. 213-220, 2010.

PRADO, C.H.B.A.; WENHUI, Z., ROJAS, M.H.C.; SOUZA, G.M. Seasonal leaf gas exchange and water potential in a woody cerrado species community. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 16, n. 1, p. 7-16, 2004.

ROMERO, P.; BOTÍA, P. Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas Exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. **Environment and Experimental Botany**, v. 56, p. 158-173, 2006.

SANTOS, C. M. dos.; VERISSÍMO, V.; WANDERLEY FILHO, H. C. de. I.; FERREIRA, V. M.; CAVALCANTE, P. G. da. S.; ROLIM, E. V.; ENDRES, L. Seasonal variations of photosynthesis, gas exchange, quantum efficiency of photosystem II and biochemical responses of *Jatropha curcas* L. grown in semi-humid and semi-arid areas subject to water stress. **Industrial Crops and Products**. v. 41, p. 203–213, 2013.

SCHWINNING, S., & J. R. EHLERINGER. Water use trade-offs and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystems, **Journal Ecology**, v. 89, p. 464–480, 2001.

SILVA, E. C. da.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; AZEVEDO NETO, A. D. de.; BRITO, J. Z. de.; CABRAL, E. L. Aspectos ecofisiológicos de dez espécies em uma área de caatinga no município de Cabaceiras, Paraíba, Brasil. **IHERINGIA, Série Botânica**, Porto Alegre, v. 59, n. 2, p. 201-205, 2004.

SOUZA, G. M.; RIBEIRO, R. V.; SATO, A.M.; OLIVEIRA, M. S. Diurnal and seasonal carbon balance of four tropical tree species differing in successional status. **Brazilian Journal Biology**, n. 68, v. 4, p. 781-793, 2008.

STRECK, N. A. Stomatal response to water vapor pressure deficit: an unsolved issue. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 09, n. 04, p. 317-322, 2003.

TROVÃO, D. M. B. M.; FERNANDES, P. D.; ANDRADE, L. A.; DANTAS NETO, J. D. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 307-311, 2007.

YU, D.J.; KIM, S.J.; LEE, H.J. Stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis in field-grown grapevine cultivars. **Biologia Plantarum**, 53, p. 133–137, 2009.

## CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho foi oriundo da realização de medidas contínuas da transferência de dióxido de carbono, energia e vapor d'água em um fragmento preservado de Caatinga na região de Petrolina-PE durante um ano seco (2012). Nesse caso, a observação dessas condições compreende uma oportunidade única para entender como a variabilidade climática, a seca, pode influenciar nas trocas de energia, dióxido de carbono e vapor d'água no ecossistema presente neste fragmento do bioma Caatinga. Com base nos resultados encontrados, pode-se concluir que:

Em termos sazonais o comportamento do saldo de radiação ( $R_n$ ) apresentou valores máximos no início do verão, sendo influenciados pelas mudanças observadas na vegetação que influenciaram no padrão de resposta;

A maior parte da energia disponível foi destinada ao fluxo de calor sensível ( $H$ ), sendo maximizada em decorrência da seca;

A evapotranspiração sob condições de seca intensa foi especialmente dependente do déficit de pressão de vapor e do controle da superfície;

A assimilação de dióxido de Carbono ( $NEE$ ) e seus componentes, produtividade primária bruta ( $PPB$ ) e respiração do ecossistema ( $Re$ ) estiveram condicionados à ocorrência de eventos de precipitação na Caatinga;

Durante o ano seco a Caatinga atuou como fonte de  $CO_2$  para atmosfera, com uma emissão igual a  $468,18 \text{ gC m}^{-2}\text{ano}^{-1}$ , sendo necessária a realização de estudos em anos com precipitações próximas à normal observada para a região para a melhor compreensão da interação do ecossistema com a atmosfera;

A disponibilidade hídrica foi determinante para a magnitude das taxas de transpiração de fotossíntese e sobre a eficiência do uso da água de todas as espécies analisadas;

Sob condição de disponibilidade hídrica ocorre uma maximização da assimilação de  $CO_2$  em detrimento da eficiência do uso da água, sendo a primeira sempre mais pronunciada no início da manhã.