

POLIANA DE CALDAS PEREIRA

**PROCESSOS E PADRÕES DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA E DA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA A PALMA FORRAGEIRA**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

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

T

P436p
2017

Pereira, Poliana de Caldas, 1987-

Processos e padrões de transferência de energia e da disponibilidade hídrica para a palma forrageira / Poliana de Caldas Pereira. – Viçosa, MG, 2017.

xv, 93f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Sérgio Zolnier.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Micrometeorologia. 2. Palma forrageira. 3. *Opuntia stricta*. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola. II. Título.

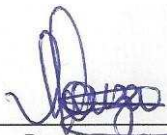
CDD 22 ed. 630.2515

POLIANA DE CALDAS PEREIRA

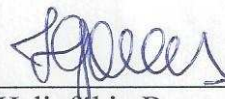
**PROCESSOS E PADRÕES DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA E DA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA A PALMA FORRAGEIRA**

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*.

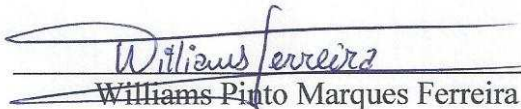
APROVADA: 18 de agosto de 2017.



Luciana Sandra Bastos de Souza



Heliofábio Barros Gomes



Williams Pinto Marques Ferreira



Thieres George Freire da Silva
(Coorientador)



Sérgio Zolnier
(Orientador)

*De maneira muito especial ao meu filho João Pedro;
aos meus pais Pedro e Erotildes;
aos meus irmãos Ermiliano e Eliane;
e aos meus sobrinhos Alícia, Beatriz e Matheus
que, ao longo de minha vida,
com muito amor e dedicação,
serão os meus principais estímulos
para a realização de tudo que faço.*

*“Não basta ser bom, tem que ser espetacular.
Não dá para ser a mesma coisa...
Tem que ser sempre diferente.”*
(Thieres G. F. da Silva)

*“Podem até me chamar de sonhador, mais não sou o único,
pois para chegar até aqui tive ajuda de outros”.*
(John Lennon)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por se fazer presente em todos os momentos firmes ou trêmulos, onde pude sentir a sua mão na minha, transmitindo segurança necessária para enfrentar o meu caminho e seguir.

À minha família, pelo amor incondicional, força e compreensão existente entre nós e, principalmente, por acreditarem e não desistirem de mim.

Ao professor Sérgio Zolnier, pela orientação, profissionalismo e ensinamentos durante a realização deste trabalho.

Ao professor Thieres George Freire da Silva, por sua amizade, pelas inúmeras oportunidades e pelo carinho em transmitir os seus conhecimentos que seguiram firmes ao longo da minha vida acadêmica, finalizando aqui mais um ciclo.

Aos meus colegas do “GAS” (Grupo de Agrometeorologia no Semiárido), especialmente Carlos André, Maria Gabriela, Mery, Jadna, Alexandre, George, Marcelo, Jandis, “Leo”, “Peu”, Orlando, Kaique, Renan, Cleber, Mateus, Raweny, Hygor e Danielle, que foram fundamentais para execução desta pesquisa, principalmente por todos os nossos momentos de trabalhos e lazer onde curtimos e trocamos conhecimentos, os quais fortaleceram a nossa amizade.

Ao casal Luiz Temistocles e Maria do Socorro, por terem cedido a área para implantação do experimento e pelo carinho em nos recepcionar em sua casa.

Aos meus colegas de curso e funcionários da pós-graduação em Meteorologia Agrícola, especialmente João Vitor, Davi, Gláucio, Manuel, Vágna, Andréia, Luiz Felipe, Valéria, Ana Paula, Mariana Magalhães, Mariana Reis e a Graça, pela agradável convivência durante a realização do curso.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação.

À Unidade Acadêmica de Serra Talhada/Universidade Federal Rural de Pernambuco (UAST/UFRPE) e aos funcionários do setor de transporte, pelo apoio na realização do experimento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento do projeto.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudo.

Aos meus amigos Célia, Lucivania, Adelmo, Vinícius, Marcela, Mirian, Elisangela e Ivanilcia que me deram apoio e carinho nas mais diversas formas.

BIOGRAFIA

POLIANA DE CALDAS PEREIRA, filha de Pedro Alves Pereira e Erotildes de Caldas Pereira, nasceu em 03 de outubro de 1987, na cidade de São José do Belmonte, PE.

Em dezembro de 2005, concluiu o ensino médio pela Escola Estadual Professor Manuel de Queiroz, na mesma cidade que nasceu.

Em agosto de 2006, iniciou o curso de Agronomia pela Unidade Acadêmica de Serra Talhada, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UAST/UFRPE), localizada na cidade de Serra Talhada, PE. Durante os cinco anos de graduação, participou de atividades de iniciação científica e monitoria na qualidade de bolsista, na área de Agrometeorologia, graduando-se em julho de 2011.

Em agosto de 2011, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na cidade de Viçosa, Minas Gerais. Em nível de mestrado, avaliou a evapotranspiração e o crescimento da cultura da palma forrageira (*Nopalea* sp. e *Opuntia* sp.) na região do Semiárido nordestino, titulando-se em julho de 2013.

Em agosto de 2013, ingressou no mesmo Programa de Pós-Graduação em nível de doutorado, com trabalho voltado às relações micrometeorológicas do sistema solo-palma forrageira-atmosfera no Semiárido brasileiro, submetendo-se à defesa de tese em 18 de agosto de 2017.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Balanço de radiação e de energia em agro e ecossistemas	4
2.2. Balanço de água no solo	10
2.3. Princípios micrometeorológicos	14
2.3.1. Comprimento de rugosidade (z_0) e deslocamento do plano zero (d).....	14
2.3.2. Fetch (Bordadura).....	19
2.3.3. Footprint.....	20
2.4. Interação biosfera-atmosfera (acoplamento e desacoplamento).....	21
2.5. Evolução morfoestrutural da palma forrageira	25
2.6. Peculiaridade de agroecossistema de plantas de metabolismo ácido das crassuláceas (MAC) e suas relações com o ambiente de cultivo	27
3. CONCLUSÕES.....	34
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
ARTIGO 1 - Balanço de radiação e de energia da palma forrageira [<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.] na região do Semiárido brasileiro	43
Resumo.	43
Abstract.....	43
ARTIGO 2 - Processos e controladores de transferência de água no sistema solo-planta- atmosfera na cultura da palma forrageira [<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.]	67
Resumo.	67
Abstract.....	67

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	m^2
AC	Área dos cladódios	m^2
AC	Ascensão capilar	mm
A_f	Armazenamento de água acumulado no final do período de análise	mm
A_i	Armazenamento de água acumulado no início do período de análise	mm
BAS	Balanço de água no solo	-
BOC	Balanço de onda curtas	Wm^{-2} ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
BOL	Balanço de ondas longas	Wm^{-2} ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
C_a	Condutância aerodinâmica	$m s^{-1}$
C_D	Coefficiente de resistência aerodinâmica	-
CLI	Camada limite interna	-
CO ₂	Dióxido de carbono	-
C_p	Calor específico do ar a pressão constante	$J kg^{-1} °C^{-1}$
c_p	Calor específico do ar úmido à pressão constante	$J kg^{-1} °C^{-1}$
C_s	Condutância da superfície	$m s^{-1}$
C_{vh}	Capacidade calorífica do volume	$J m^{-3} °C^{-1}$
d	Deslocamento do plano zero	m
D	Drenagem interna	mm
Dqr	Varição horária da umidade do ar acima do dossel	$(g kg^{-1})$,
DTr	Varição horária da temperatura acima do dossel	°C
DTr*	Diferença de temperatura do ar acima do dossel defasado em 1 h	°C
E1	Espaçamento entre fileiras	m
e_1	Pressão de vapor atual no nível um acima do dossel da cultura	kPa
E2	Espaçamento entre plantas	m
e_2	Pressão de vapor atual no nível dois acima do dossel da cultura	kPa
ea	Pressão do vapor d'água	kPa
es	Pressão de saturação de vapor	kPa
es - ea	Déficit de pressão de vapor d'água	kPa
ET	Evapotranspiração	mm

F	Energia utilizada no processo de fotossíntese	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
fRFAin	Radiação fotossinteticamente ativa interceptada,	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
g	Aceleração da gravitacional	$m s^{-1}$
G	Fluxo de calor no solo	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
h	Altura da cultura	-
H	Fluxo de calor sensível	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
H2O	Água	-
I	Irrigação	mm
IAC	Índice de área de cladódio	$m^2 m^{-2}$
k	Constante de Von Karman	-
K (θ)	Condutividade hidráulica do solo	$cm h^{-1}$
Ko	Condutividade hidráulica no solo saturado	$cm h^{-1}$
LE	Fluxo de calor latente	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
LM-O	Comprimento de Monin-Obukhov	m
MAC	Metabolismo ácido das crassuláceas	-
Misc	Estoque de energia na biomassa e armazenamento no dossel da cultura	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
O2	Oxigênio	-
P	Precipitação	mm
Q	Fluxo vertical de água no solo	mm
R	Escoamento superficial de entrada e saída	mm
R' _e	Escoamento sub-superficial de saída	mm
R' _s	Escoamento sub-superficial de saída	mm
r _a	Resistências aerodinâmica	$s m^{-1}$
R _e	Escoamento superficial de entrada	mm
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
RFAa	Radiação fotossinteticamente ativa incidente	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
RFAb	Radiação fotossinteticamente ativa abaixo da cultura	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
Rg	Radiação solar global	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
Rn	Saldo radiação solar	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
ROC	Radiação solar de ondas curtas	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
ROL	Radiação de ondas longas	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
ROLa	Radiação de ondas longas proveniente da atmosfera	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
ROLe	Radiação de ondas longas emitida pela superfície	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$

Rr	Radiação solar refletida	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
R _s	Escoamento superficial de entrada	mm
r _s	Resistências da superfície	s m ⁻¹
S	Armazenamento de calor no solo	$W m^{-2}$ ou $MJ m^{-2} d^{-1}$
SCI	Subcamada inercial	-
SCR	Subcamada rugosa	-
T	Temperatura absoluta da superfície	K
T ₁	Temperatura do ar no nível um acima do dossel da cultura	°C
T ₂	Temperatura do ar no nível dois acima do dossel da cultura	°C
t _{bs1}	Temperaturas do bulbo seco na altura do nível um	°C
t _{bs2}	Temperaturas do bulbo úmido na altura do nível dois	°C
t _{bu1}	Temperaturas do bulbo úmido na altura do nível um	°C
t _{bu2}	Temperaturas do bulbo úmido na altura do nível dois	°C
T _k	Temperatura do ar	K
u [*]	Velocidade de fricção	m s ⁻¹
Uz	Velocidade horizontal média do vento à altura z	m s ⁻¹
V	Volume	m ⁻³
y	Coefficiente angular da reta	-
z	Altura de medição do vento	m
z*	Limite superior da subcamada rugosa	m
z _h	Altura de medição da umidade	-
z _m	Altura de medição dos valores de velocidade do vento acima do dossel da cultura	m
z _o	Comprimento da rugosidade	m
z _{oh}	Comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor entre a superfície e a atmosfera	m
z _{om}	Comprimento de rugosidade transferência de domínio de momentum	m
α	Albedo da superfície	-
β	Razão de Bowen	-
γ	Constante psicrométrica	kPa °C ⁻¹
δ(X)	Rugosidade do terreno dentro da camada limite interna com altura limitada	-

Δ	Tangente da curva de pressão de saturação de vapor d'água	kPa °C ⁻¹
ΔA	Varição do armazenamento	mm
$\Delta\psi_t/\Delta z$	Gradiente do potencial de água no solo	m m ⁻¹
$\partial U/\partial z$	Gradiente vertical da velocidade horizontal do vento	-
ϕ_m	Gradiente adimensional do vento	-
Δe	Gradiente de pressão de vapor	°C
ΔT	Gradiente de temperatura	°C
Δt	Intervalo de tempo	-
ε	Emissividade da superfície	-
θ	Conteúdo de água	cm ³ cm ⁻³
θ_0	Valor da umidade de saturação	cm ³ cm ⁻³
ρ	Massa específica do ar	kg m ⁻³
ρ_a	Densidade do ar	kg m ⁻³
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W m ⁻² K ⁻⁴
Ψ_h	Fator de correção da estabilidade atmosférica para transferência de calor sensível	-
ψ_h	Fator de correção para o fluxo de calor sensível	-
ψ_m	Fator de correção para o fluxo de momentum	-
ψ_t	Potencial total de água no solo	-
Ω	Fator de desacoplamento	-

RESUMO

PEREIRA, Poliana de Caldas, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2017. **Processos e padrões de transferência de energia e da disponibilidade hídrica para a palma forrageira.** Orientador: Sérgio Zolnier. Coorientadores: Thieres George Freire da Silva e Antonio José Steidle Neto.

A palma é uma espécie muito cultivada no Nordeste brasileiro para fins de alimentação animal, em especial no semiárido, onde a baixa disponibilidade hídrica, alta temperatura e solos com pouca fertilidade dificultam o cultivo de outras plantas forrageiras. O seu bom desempenho, nesses ambientes, deve-se ao metabolismo fotossintético MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas), que induz a planta a modificações morfológicas e de trocas de massa e energia ao longo do ano como resultado das condições meteorológicas, afetando, assim, a interação planta-ambiente. No presente estudo, investigou-se os processos e padrões dos fluxos de radiação, energia e água, e suas partições no sistema solo-palma-atmosfera em resposta à variação sazonal do regime hídrico e evolução do crescimento da espécie *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. O experimento foi conduzido no período de 10 de dezembro de 2015 a 09 de dezembro de 2016, no município de Floresta, no estado de Pernambuco. Uma torre micrometeorológica foi montada para coleta de dados a partir de sensores eletrônicos. Os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H) foram estimados pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen e o controle da evapotranspiração analisado por meio do fator de desacoplamento (Ω). O conteúdo de água no solo (CAS) e seu escoamento foram obtidos para mensuração do balanço de água no solo (BWS). Dados biométricos e o índice de área do cladódio (IAC, $m^2 m^{-2}$) foram obtidos. Os dados experimentais foram agrupados e analisados em períodos denominados: “seco”, “chuvoso”, “transição seco-chuvoso” e “transição chuvoso-seco”. Constatou-se que a sazonalidade da maioria dos componentes dos balanços de radiação e energia esteve associada à disponibilidade hídrica e ao IAC. No período “chuvoso”, houve alta retenção de energia no sistema, com uma elevada média do saldo de radiação ($13,38 MJ m^{-2} dia^{-1}$) e baixa taxa da radiação refletida ($2,77 MJ m^{-2} dia^{-1}$), resultando em um baixo valor de albedo (14%). O IAC influenciou significativamente na dinâmica da radiação fotossinteticamente ativa que chega abaixo da cultura (RFAb), proporcionando a menor média desse componente ($2,29 MJ m^{-2} dia^{-1}$) quando houve a maior taxa desse índice, o

que aumentou, nessa época, a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (73%). A baixa disponibilidade hídrica da região e os distintos valores de IAC das diferentes épocas de disponibilidade hídrica fizeram com que a maior parte da energia disponível do balanço de energia fosse para o calor sensível (50%), vindo em sequência o calor latente (38%), o calor no solo (10%) e o estoque de energia na biomassa e armazenamento no dossel da cultura, além do armazenamento no dossel da cultura (1%). Além disso, o CAS acompanhou o comportamento da precipitação, com média $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Esse fator influenciou no comportamento dos componentes do BAS, uma vez que a água disponível foi mais utilizada para o armazenamento no solo e consumo pela cultura, apresentando taxas de evapotranspiração real (ETr) baixas ($272,4 \text{ mm ano}^{-1}$ e $0,74 \text{ mm dia}^{-1}$). Já para os mecanismos controladores da evapotranspiração, verificou-se que os valores da resistência de superfície (r_s) apresentaram-se elevados nas épocas de menores níveis pluviométricos e o contrário para a resistência aerodinâmica (r_a). O fator de desacoplamento (Ω) indicou que, para os períodos com maiores valores de precipitação, a cultura estava mais “desacoplada com a atmosfera”, sendo os valores mais próximos de um. Em contraste, apresentou valores próximos de zero nas demais épocas, indicando que a cultura estava “acoplada com a atmosfera”.

ABSTRACT

PEREIRA, Poliana de Caldas, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2017.
Processes and patterns of energy transfer and water availability of cactus pear.
Adviser: Sérgio Zolnier. Co-advisers: Thieres George Freire da Silva and Antonio José Steidle Neto.

Cactus pear is a very cultivated species in the Brazilian Northeast for animal feeding purposes, especially in the semi-arid region, where low water availability, high temperature and low fertility soils make it difficult to grow other forage plants. Its good performance in these environments is due to the photosynthetic metabolism CAM (Crassulacean Acid Metabolism), which induces the plant to morphological changes and exchanges in mass and energy throughout the year as a result of meteorological conditions, thus affecting the interaction between plant-environment. In the present study, the processes and patterns of radiation, energy and water fluxes and their partitions in the soil-palm-atmosphere system were investigated in response to the seasonal variation of the water regime and the evolution of the growth of *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. The experiment was conducted in the period from December 10, 2015 to December 9, 2016, in the municipality of Floresta, in the state of Pernambuco. A micrometeorological tower was set up to collect data from electronic sensors. The latent (LE) and sensible (H) fluxes were estimated based on the energy balance method based on the Bowen ratio, and the evapotranspiration control was analyzed using the decoupling factor (Ω). The soil water content (SWC) and water flow were obtained to measure the soil water budget (SWB). Biometric data and the cladode area index (CAI, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) were obtained. The experimental data were grouped and analyzed in periods called "dry", "rainy", "dry-rainy transition" and "rainy-dry transition". It was verified that the seasonality of most of the components of the radiation and energy balances was associated with water availability and CAI. In the "rainy" period there was high energy retention in the system, with a high mean radiation balance ($13.38 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) and low reflected radiation rate ($2.77 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), proceeding at a low albedo value (14%). The CAI significantly influenced the dynamics of photosynthetically active radiation arriving below the culture (RFAb), giving the lowest mean of this component ($2.29 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) when there was the highest rate of this index, increasing in this period the fraction of the photosynthetically active radiation intercepted (73%). The low

water availability of the region and the different CAI values of the different times of water availability influenced in a way that most of the available energy in the energy balance was for sensible heat (50%), followed by the latent heat (38 %), soil heat (10%) and energy storage in biomass and storage in the canopy of the crop, besides storage in the canopy of the crop (1%). In addition, the SWC was affected by the precipitation behavior, with an average of $0.06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, factor that influenced the behavior of the SWB components, since the available water was more used for soil storage and crop consumption, presenting low real evapotranspiration rates (ETr) ($272.4 \text{ mm year}^{-1}$ and 0.74 mm day^{-1}). As for the control mechanisms of evapotranspiration, it was verified that the values of the surface resistance (r_s) were elevated in times of lower rainfall levels and the opposite for the aerodynamic resistance (r_a). The Ω indicated that, for the periods of higher levels of rainfall, the culture was more "decoupled to the atmosphere", with values closer to one, presenting in the other periods values close to zero, indicating that the culture was "coupled to the atmosphere".

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica do sistema solo-planta-atmosfera está diretamente associada aos processos físicos que governam o transporte de energia e de massa (GONDIM et al., 2015). Esses processos mudam conforme o tipo de ecossistema, pois são dependentes do ciclo biogeoquímico, fisiologia vegetal, regime hídrico do solo e do clima de cada região (FISHER et al., 2008; COSTA et al., 2010). O entendimento dessas relações possibilita avaliar as alterações no microclima da biosfera em função do desenvolvimento das plantas, e das condições edáficas e atmosféricas locais, além de permitir a análise de fatores que controlam a transferência de vapor d'água (McNAUGHTON; JARVIS, 1983).

A compreensão desses processos, que possuem influência mútua entre a biosfera-atmosfera, pode ser obtida por procedimentos micrometeorológicos (QIN et al., 2008; CONSOLI et al., 2013; DICKEN et al., 2013), bem como por meio de estudos de crescimento e fisiologia vegetal do sistema de interesse (SILVA et al., 2011). Por esse motivo, nos últimos anos ocorreu aumento de pesquisas que analisam a variação espaço-temporal dos fluxos de energia e as suas relações com a dinâmica de água e de crescimento de distintos ecossistemas (JUNXIA et al., 2007).

Entre esses processos, o balanço de energia tem sido utilizado, particionando o saldo de radiação e avaliando as alterações do microclima do agroecossistema em função do estágio de desenvolvimento das espécies, incluindo condições de solo e atmosfera (FONTANA et al., 1991). Dessa forma, torna-se possível reconhecer a fração destinada para o aquecimento do ar e do solo, bem como os eventos de transferência de vapor d'água (SUN et al., 2010; DICKEN et al., 2013).

As perdas de água para a atmosfera em superfícies vegetadas, bem como o comportamento de vários elementos meteorológicos, podem ser aprimoradas empregando-se também o processo do balanço de radiação e suas variações, que similarmente ao balanço de energia, faz uso da partição do saldo de radiação. Assim, são determinadas as entradas e saídas dos fluxos de radiação dos componentes de ondas curtas e de ondas longas emitidas pela interface superfície-atmosfera (ANDRÉ et al., 2010).

O particionamento dos fluxos de energia em sistemas vegetais fornece informações sobre o uso produtivo da água através da evapotranspiração, que é relevante para a produção de alimentos, e o funcionamento do ecossistema e do clima (KOOL et al., 2016).

Essa dinâmica de transferir vapor d'água no sistema solo-planta-atmosfera está sujeita a mecanismos que controlam evapotranspiração, sendo esses comandados pela resistência estomáticas das folhas do dossel e a evaporação da superfície do solo (resistência da superfície, r_s), mais a resistência acima da vegetação que envolve a fricção do ar e as propriedades aerodinâmicas da superfície (resistência aerodinâmica, r_a) (ALLEN et al., 1998; MATSUMOTO et al., 2008). Por isso, muitas vezes para avaliar essa dinâmica de transferência é utilizado o fator de desacoplamento (Ω) (MARIN; ANGELOCCI, 2011; SILVA et al., 2012), composto pela junção dessas duas resistências (NICOLÁS et al., 2008).

O fator de desacoplamento (Ω) varia no intervalo de 0 a 1 ($0 < \Omega < 1$), sendo que valores próximos ou iguais a 0 indicam que a transpiração vegetal depende do controle dos estômatos. Neste caso, as características atmosféricas de vento e umidade executam um controle maior sobre a transferência de vapor d'água para atmosfera, considerando, assim, que superfície vegetada está “acoplada com a atmosfera”. No entanto, para os valores próximos de 1, a transpiração está mais sensível ao saldo de radiação solar. Neste caso, o fluxo de vapor d'água é dificultado pela saturação do ar e a maior contribuição ao processo de evapotranspiração se deve à entrada de radiação, considerando-se então que a superfície está “desacoplada com a atmosfera” (McNAUGHTON; JARVIS, 1983; SILVA et al., 2012).

A determinação da evapotranspiração da superfície e a identificação das relações dos seus crescimentos, em função da partição da energia disponível por medidas dos fluxos de energia, têm sido empregadas em vários sistemas. Tratando-se de ambientes compostos por espécies pertencentes à comunidade MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas), apesar dos poucos trabalhos, já são encontrados estudos sobre as relações de transferência de energia (NOBEL; BOBICH, 2002; SAN JOSÉ et al., 2007; CONSOLI et al., 2013), sazonalidade hidrodinâmica (SANTANA et al., 2013; SILVA et al., 2014a) e evolução do crescimento nessas plantas (PINHEIRO et al., 2014), que são informações que auxiliariam compreensão de suas respostas aos diferentes ambientes de cultivo.

Um exemplo de espécie pertencente a esse grupo é a palma forrageira (*Nopalea* sp. e *Opuntia* sp.), cultura muito utilizada na agropecuária mundial e considerada como principal recurso para alimentação animal do Nordeste brasileiro durante o período de estiagem. Isso deve-se à característica fisiológica das plantas MAC que fecham os seus estômatos durante o dia, evitando a perda de água nesse horário. Em contraste, os

estômatos são abertos à noite, quando há um baixo déficit da pressão de saturação de vapor d'água, diminuindo essa perda para o ambiente, o que proporciona mecanismos de sobrevivência a ambientes com escassez hídrica, altas temperaturas e solos de baixa fertilidade (HERNÁNDEZ et al., 2004; TEGEGNE et al., 2007).

Entretanto, apesar de sua alta adequabilidade a ambientes não muito propícios para o desenvolvimento de outras plantas forrageiras e da sua importância no cenário agrícola do nordeste brasileiro e mundial, são inexistentes pesquisas micrometeorológicas com essa espécie. Uma vez que o seu crescimento responde de forma diferente às condições meteorológicas locais, fator que influencia na dinâmica de assimilação de CO₂ e, conseqüentemente, na sua eficiência fotossintética, distintos padrões de particionamento dos fluxos no sistema solo-planta-atmosfera podem ser observados.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo analisar os processos e padrões dos fluxos de radiação, energia e água, e suas partições no sistema “solo-palma-atmosfera” em resposta à variação sazonal do regime hídrico e da evolução do crescimento da palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.].

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Balanço de radiação e de energia em agro e ecossistemas

Embora a temperatura média em qualquer lugar na Terra possa variar consideravelmente de um ano para outro, a sua média global sofre apenas uma ligeira alteração na temperatura de equilíbrio, nesse mesmo intervalo. Este acontecimento indica que a cada ano a Terra e sua atmosfera devem emitir para o espaço apenas a energia recebida do sol. Esse mesmo tipo de balanço energético deve existir entre a superfície da Terra e a atmosfera, sendo que a superfície terrestre precisa dissipar para a atmosfera a mesma quantidade de energia que absorveu. Caso isso não ocorra, a temperatura média da superfície terrestre seria alterada (AHRENS, 2000).

A compreensão desse balanço energético anual se fundamenta no fato de que a energia que atingi o topo da atmosfera da Terra (100%) é, em média, 30% refletida pelas nuvens, superfície e atmosfera, voltando ao espaço. Além disso, 19% dessa energia é absorvida pela atmosfera e nuvens, restando 51% de radiação solar direta e indireta para ser absorvida pela superfície terrestre, em forma de radiação de ondas curtas (ROC) (Figura 1) (AHRENS, 2000).

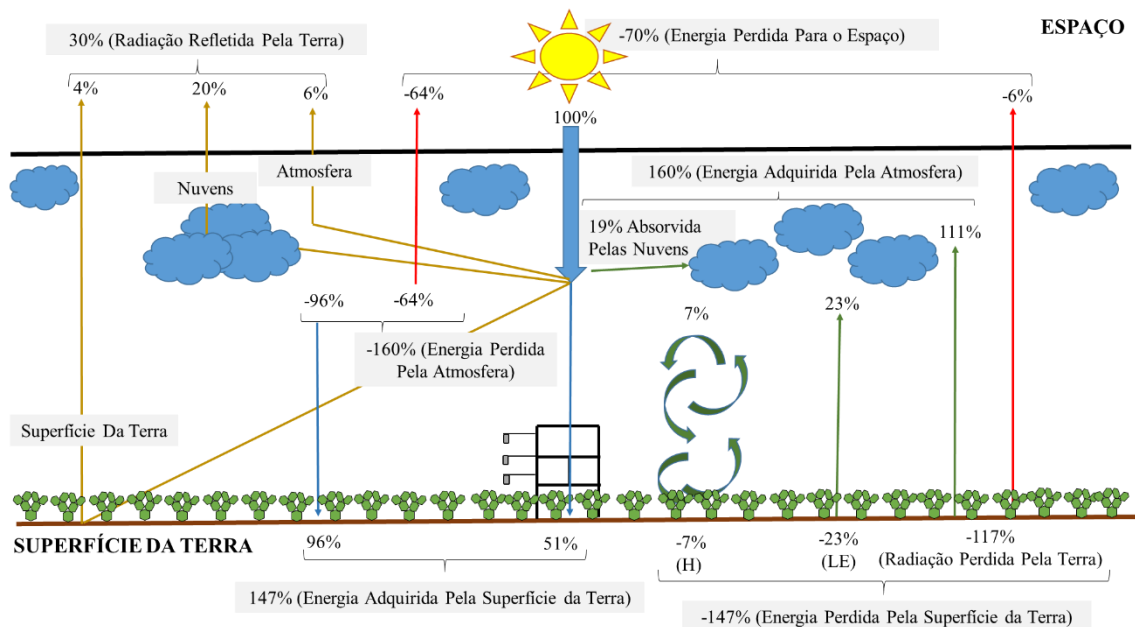


Figura 1 – Balanço energético da superfície terrestre.

Desses 51% que alcançam a superfície, 23% são utilizados para evaporar a água e, aproximadamente, 7% são perdidos por meio da condução e convecção, deixando 21% para ser irradiada para fora na forma de radiação de ondas longas (ROL). Entretanto, a superfície da Terra na verdade irradia 117% de ROL, isto porque ela recebe energia da radiação solar de ondas curtas (ROC) somente durante o dia, e a sua superfície emite ROL tanto durante o dia como a noite. Além do mais, a atmosfera só permite que 6% dessa energia passe para o espaço, onde a maior parte (111%) é absorvida pelo vapor de água, gases do efeito estufa e por nuvens. Cerca de 96% dessa energia é então irradiada de volta para Terra, proporcionando o efeito estufa atmosférico. Desta forma, a superfície da Terra recebe quase duas vezes mais quantidade de energia ROL da atmosfera, como faz a ROC derivada do sol (51%). Em todas essas trocas, percebe-se que a energia perdida pela superfície terrestre está relacionada com a energia adquirida (147%) (Figura 1) (AHRENS, 2000).

Um equilíbrio semelhante existe entre a superfície da Terra e sua atmosfera, em que a atmosfera perde 160% da energia adquirida. Para a média de um ano inteiro, a energia solar recebida pela superfície (51%) e a que é absorvida pela atmosfera da Terra (19%) equilibra a energia da ROL perdida para o espaço pela superfície da Terra (6%) e a sua atmosfera (64%) (Figura 1) (AHRENS, 2000).

Considera-se o efeito da condução, da convecção e do calor latente no aquecimento da atmosfera para o balanço de energia. Em termos radiativos, a superfície da Terra recebe 147% de energia, sendo composta em parte da energia radiante do Sol (51%) e da sua própria atmosfera (96%). Ao mesmo tempo, irradia 117%, produzindo um excedente de 30%. Por sua vez, a atmosfera recebe 130%, em que 19% são oriundos do Sol e 111% da Terra. Concomitantemente, perde 160 %, produzindo um déficit de 30%. O equilíbrio (30%) é o aquecimento da atmosfera produzido pelos processos de transferência de calor por condução e convecção (7%) e pela liberação de calor latente (23%) (Figura 1) (AHRENS, 2000).

Desta forma, a Terra e a atmosfera absorvem a energia a partir do sol, assim como uma da outra, mantendo um delicado equilíbrio. Basicamente, não há nenhum ganho ou perda anual de energia total e as temperaturas médias da Terra e da atmosfera permanecem razoavelmente constantes de um ano para o outro (AHRENS, 2000).

Nesse balanço energético da superfície terrestre, pode-se destacar o balanço de radiação e suas variações na superfície vegetada, as quais consistem no saldo de entradas e saídas dos fluxos de radiação na interface superfície-atmosfera, podendo ser

medido ou estimado, por meio da radiação de ondas curtas, incidente e refletida, e da radiação de ondas longas emitida pela superfície e atmosfera (FONTANA et al., 1991).

O saldo radiação em uma superfície (R_n , MJ m⁻² d⁻¹) é composto pelo balanço de onda curtas (BOC, MJ m⁻² d⁻¹) e de ondas longas (BOL, MJ m⁻² d⁻¹):

$$R_n = \text{BOC} + \text{BOL}$$

(1)

A determinação do BOC pode ser realizada a partir da radiação solar global (R_g , MJ m⁻² dia⁻¹), que é a soma da radiação direta e difusa, mais a radiação solar refletida pela superfície (R_r , MJ m⁻² dia⁻¹), muitas vezes monitoradas por piranômetros. Esses termos são relacionados por (VIANELLO; ALVES, 1991):

$$\text{BOC} = R_g * (1 - \alpha)$$

(2)

em que α é o albedo da superfície (adimensional).

A determinação do albedo, por sua vez, pode ser realizada pela relação entre a radiação solar refletida pela superfície (R_r , MJ m⁻² dia⁻¹) e a radiação solar global (R_g , MJ m⁻² dia⁻¹) (SOUZA et al., 2010, SILVA et al., 2011):

$$\alpha = \frac{R_r}{R_g}$$

(3)

Já para a obtenção do BOL, componente composto pela radiação de ondas longas proveniente da atmosfera (ROL_a; MJ m⁻² dia⁻¹) (fluxo de energia radiante emitida pela atmosfera em direção à superfície, também denominada de contra - radiação atmosférica), utiliza-se a temperatura do ar, a quantidade de vapor d'água na atmosfera (pois o vapor absorve ondas longas) e a cobertura de nuvens. Considera-se ainda a radiação de ondas longas emitida pela superfície (ROL_e; MJ m⁻² dia⁻¹) (fluxo de energia radiante emitida pela superfície em direção à atmosfera, também conhecida por emitância radiante da superfície), que está sujeita à temperatura e a emissividade da superfície (ϵ) (VIANELLO; ALVES, 1991). Assim, esse termo é representado por:

$$\text{BOL} = \text{ROL}_a - \epsilon \sigma T^4$$

(4)

em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); e T é a temperatura absoluta da superfície (K).

Em situações que já foram determinados o BOC e o Rn (por meio do saldo radiômetro), o BOL é quantificado pela relação (SOUZA et al., 2010; SILVA et al., 2011):

$$\text{BOL} = \text{Rn} - (\text{Rg} - \text{Rr})$$

(5)

Outro balanço que merece destaque é o de energia, baseado no princípio físico de conservação de calor e massa, onde os ganhos são iguais às perdas. Em uma superfície vegetada, esse balanço proporciona medição das trocas de energia e massa no sistema solo-planta-atmosfera, por meio da partição do saldo de radiação (Rn) nos diversos processos que ocorrem na cultura. Tal método proporciona a investigação das alterações no microclima da vegetação, conforme as fases de desenvolvimento das plantas das condições de solo e atmosfera (FONTANA et al., 1991).

O saldo de radiação (Rn; $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), poderá ser então fracionado em: fluxo de calor sensível (H; $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), fluxo de calor latente (LE; $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), fluxo de calor no solo (G; $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), estoque de energia na biomassa e no dossel da cultura (Misc; $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), além da energia utilizada no processo de fotossíntese (F; $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (ANDRADE et al., 2009a), expressa matematicamente como:

$$\text{Rn} = \text{LE} + \text{H} + \text{G} + \text{Misc} + \text{F}$$

(6)

Esses componentes podem ser determinados por sensores ou de forma empírica, onde o saldo de radiação (Rn) é medido pelo de saldo radiômetro e o fluxo de calor no solo (G) a partir de medições por fluxímetros, instalados na profundidade desejada do solo (LIMA et al., 2011).

Já para os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), estes podem ser determinados pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen (SOUZA et al., 2008; TEIXEIRA et al., 2008; DICKEN et al., 2013; GONDIM et al., 2015), a partir de:

$$\text{LE} = \frac{\text{Rn} - \text{G}}{1 - \beta}$$

(7)

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 - \beta}$$

(8)

em que β é a razão de Bowen (adimensional).

A razão de Bowen (β) é estimada pela relação:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}$$

(9)

em que $\Delta T = T_2 - T_1$ representa variações verticais de temperatura do ar (gradiente de temperatura; °C) e $\Delta e = e_2 - e_1$ corresponde à pressão de vapor atual (gradiente de pressão de vapor; °C) na camada de ar acima do dossel da cultura, sendo obtidos mediante equações psicrométricas (VIANELLO; ALVES, 1991).

Para uma avaliação confiável dos valores de β , Perez et al. (1999) desenvolveram uma metodologia para analisar os dados de β , caracterizando os resultados médios em fisicamente “consistentes” ou “inconsistentes” e dias “válidos” ou “não válidos”. Essa metodologia é baseada nos limites de resolução dos sensores, no perfil dos gradientes de pressão de vapor e na conversão de sinais da relação fluxo-gradiente. Além disso, eles convencionaram que somente serão considerados como valores positivos de R_n e G os que estiverem orientados em direção à superfície, sendo que, para os componentes LE e H só serão positivos quando estiverem na direção oposta à superfície e aos gradientes de temperatura (Dt) e pressão de vapor (De). Assim, as combinações possíveis de valores de LE e H são as seguintes:

- a) $(R_n - G) > 0$: Se $\beta > -1$, então o valor de LE deve ser sempre positivo, enquanto H pode ser positivo (caso $\beta > 0$) ou negativo (caso $-1 < \beta \leq 0$). Se $\beta < -1$, as únicas possibilidades são $LE < 0$ e $H > 0$.
- b) $(R_n - G) < 0$: Se $\beta < -1$, as únicas possibilidades são $LE > 0$ e $H < 0$. Se $\beta > -1$, LE sempre deverá ser negativo, enquanto H pode ser negativo (caso $\beta > 0$) ou positivo (caso $-1 < \beta \leq 0$).

Caso as condições acima não sejam atendidas, o presente método estará com o sentido incorreto dos fluxos. Neste caso, os dados analisados devem ser rejeitados, e enquadram-se em erros do tipo “A” se $(R_n - G) > 0, De > 0, \beta < -1 + |\square|$; tipo “B” quando $(R_n - G) > 0, De < 0, \beta > -1 - |\square|$; tipo “C” se $(R_n - G) < 0, De > 0, \beta > -1 - |\square|$ e erro do tipo “D” quando $(R_n - G) < 0, De < 0, \beta < -1 + |\square|$ (PEREZ et al., 1999).

Outro critério de avaliação é o descarte dos valores de $\beta < -0,75$, pois poderão resultar em valores de LE e de H fisicamente inconsistentes (ORTEGA-FARIAS et al., 1996).

O estoque de energia na biomassa e o armazenamento no dossel da cultura (Misc; MJ m⁻² d⁻¹) podem ser determinados pela aplicação do seguinte procedimento (MOORE; FISCH, 1986; SANCHES et al., 2014):

$$\text{Misc} = 16,7 \Delta T_r + 28 \Delta q_r + 12,6 \Delta T_r^* \quad (10)$$

em que ΔT_r e Δq_r são variações horárias da temperatura (°C) e umidade do ar acima do dossel (g kg⁻¹), respectivamente, e ΔT_r^* é a diferença de temperatura do ar acima do dossel defasado em 1 h (°C).

Lewis e Nobel (1977) também propuseram uma equação para determinação desse componente, considerando que a cultura, que era cactácea, assumiria um volume cilíndrico, em que:

$$\text{Misc} = C_{vh} V \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (11)$$

em que C_{vh} é a capacidade calorífica do volume (V) que sofre uma variação da temperatura (ΔT), em um intervalo de tempo (Δt).

É interessante relatar que a energia utilizada no processo de fotossíntese (F), o estoque de energia na biomassa e o armazenamento no dossel da cultura (Misc), em muitas ocasiões, podem não serem considerados na determinação do particionamento do balanço de energia de uma superfície vegetada (VILLA NOVA et al., 2007). Esse fato deve-se as mesmas apresentarem valores muito baixos, não sendo quantitativamente significativas para o balanço, podendo, por exemplo, a taxa de P alcançar pouco menos de 3% do saldo de radiação em culturas anuais (VILLA NOVA et al., 2007). Similarmente, a taxa de Misc pode ter valores variando de 3 a 10% do saldo de radiação (R_n) em floresta, o qual é dependente da arquitetura da planta, altura e densidade de cobertura (MOORE; FISCH, 1986).

Como já citado, os componentes F e Misc representam, separadamente, uma pequena fração do balanço de energia, desconsiderados em algumas ocasiões. Entretanto, quando a junção deles é avaliada, poderá ser constatada uma parcela

significativa desse balanço e, assim, auxiliar na compreensão do fechamento do mesmo. Meyers e Hollinger (2004) observaram, para as culturas do milho e da soja, que o fluxo combinado de armazenamento constitui 8 e cerca de 14% do saldo de radiação, respectivamente.

McCaughey (1985) encontrou valores de armazenamento de energia, para uma floresta mista madura em termos de proporção total, variando de 1 a 15% do R_n , sendo, porém, observados valores entre 5 e 10% com mais frequência. Assim, quando o dossel estava seco e o saldo de radiação elevado, esse valor de armazenamento ficava em torno de 2 a 3% do R_n , podendo chegar até 10% em dias nublados, ou durante e após a precipitação.

Essa diferença do armazenamento de energia entre os períodos de maior e menor disponibilidade pluviométrica, também foi investigada por Sanches et al. (2014), para floresta de *Vochysia divergens* Pohl no Pantanal brasileiro, que possuem média superior na estação chuvosa ($26,5 \text{ W m}^{-2}$) em relação à seca ($24,9 \text{ W m}^{-2}$). Já para floresta de terra firme da Amazônia, os valores de armazenamento de calor eram superiores a 50 W m^{-2} , excedendo em algumas ocasiões a 80 W m^{-2} , durante a estação seca (MOORE; FISCH, 1986).

2.2. Balanço de água no solo

Um dos grandes problemas na agricultura é o déficit de água no solo, o qual afeta praticamente todos os aspectos de crescimento nas plantas com modificações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas (SANTOS; CARLESSO, 1998; CAVALCANTE et al., 2009). Informações sobre como as plantas respondem aos níveis de armazenamento de água no perfil do solo são utilizadas para o estabelecimento de estratégias eficazes de manejo que permitam o melhor uso das reservas hídricas pelas culturas (HILLEL, 1998).

Desta forma, a aquisição da resposta de como as plantas reagem às condições de disponibilidade de água é importante. Para isso, aplicam-se metodologias que analisam o conteúdo de água no perfil do solo, dentre as quais o método do balanço de água no solo (BAS), que combina informações das entradas e saídas deste componente em um volume de controle, delimitado pela superfície até a profundidade desejada (dependendo do sistema radicular da cultura), durante um determinado intervalo de tempo (LIBARDI, 2005).

Por meio desta técnica, é possível conseguir a demanda de água de uma cultura através da determinação da sua evapotranspiração (MOUNZER et al., 2008; MOROKE et al., 2011; WARD et al., 2012), além do acompanhamento da quantidade de água armazenada no solo, ajudando a definir os períodos mais prováveis de déficit hídrico (LIBARDI, 2005; RAES et al., 2006; MA et al., 2013).

Tal metodologia considera como entradas de água no sistema a precipitação (P, mm), a irrigação (I, mm), o escoamento superficial de entrada (R_e , mm), o escoamento sub-superficial de saída (R'_e , mm) e da ascensão capilar (AC, mm). E a saída é formada pela drenagem interna (D, mm), evapotranspiração (ET, mm), escoamento superficial de entrada (R_s , mm), escoamento sub-superficial de saída (R'_s , mm) (LIBARDI, 2005), ficando expresso da seguinte maneira:

$$\Delta A = P + I + R_e + R'_e + AC + D + ET + R_s + R'_s \quad (12)$$

em que ΔA é a variação do armazenamento de água no solo (mm).

Entre os parâmetros da equação do BAS, a precipitação e a irrigação são os componentes que possuem maior facilidade de aquisição, podendo ser obtidos com a utilização de pluviômetros na área de interesse e por meio de teste de vazão no sistema de irrigação para confirmação do turno de rega aplicado em determinada espécie, respectivamente.

O armazenamento de água no perfil é adquirido pela integração dos perfis de conteúdo de água no solo, sendo muitas vezes utilizadas sondas com princípios FDR (reflectometria no domínio da frequência) e TDR (reflectometria no domínio do tempo) ou até mesmo tensiômetros instalados no campo, via curva de retenção, para executar leituras ao longo das profundidades desejadas.

Já a medida do escoamento superficial no campo é mais atribulada e, em muitas pesquisas, esse termo pode ser desconsiderado (SILVA, 2007). Em situações em que a declividade do terreno é nula, mesmo que a intensidade da chuva seja maior que a capacidade de infiltração do solo, toda água acaba infiltrando e o valor da enxurrada é inexistente. Na prática, despreza-se o efeito da enxurrada para declividades entre 0 e 0,5% (0,5 m de desnível para cada 100 m na horizontal). Por outro lado, a medida da enxurrada, em princípio, é simples, medindo-se o volume de água (V) que escorre e sai de uma área (A), assim, a enxurrada é dada por $h=V/A$. Porém, é muito difícil estimar o volume de água que escorre e definir o tamanho de uma área que seja representativa. De qualquer forma, a área (A) deve ser grande e delimitada por meio de diques (tábuas,

alvenaria, folha metálica ou mesmo solo) e, na parte inferior, deve ser colocado um dispositivo para a coleta do volume (V) de água que escoou (REICHARDT, 1987).

A ascensão capilar e a drenagem profunda, por sua vez, podem ser obtidas pela equação de Darcy-Buckingham, que envolve a função de condutividade hidráulica do solo, uma das propriedades mais importantes para pesquisas. Esta engloba a infiltração e os fluxos de água no perfil, conseguindo ser estimada diretamente em campo pelo método do perfil instantâneo. Entretanto, esse método envolve instrumentação adequada, tempo e trabalho para ser executado (SILVA, 2007).

Além da importância do BAS como ferramenta para aferir as entradas e saídas de água no solo e, por consequência, definir os períodos mais prováveis de déficit hídrico para uma cultura, ele não está relacionado só ao conhecimento dos elementos que o compõem, mas também às características da planta, especialmente da sua fenologia que representa o ponto inicial para a explicação coesa dos resultados desse método (CINTRA et al., 2000).

Essa metodologia é indispensável para o acompanhamento da quantidade de água armazenada no solo, a qual deve ser mantida em níveis ótimos para maximizar a produção agrícola. Desta forma, utilizadas as informações do BAS, pode-se estabelecer critérios para a drenagem de um solo (em casos de excessos de água) ou a sua irrigação (reposição de água no solo) (REICHARDT, 1987).

Em situações práticas, onde existe uma garantia de que os fluxos laterais podem ser desprezados, o componente evapotranspiração pode ser adquirido por diferença dos demais elementos do BAS (LIBARDI, 2005). Silva et al. (2014a) determinaram a evapotranspiração da cultura da palma forrageira (*Nopalea* sp. e *Opuntia* sp.) seguindo essa lógica, destacando em seu estudo que, devido a área possuir baixa declividade, os ganhos e perdas de água por escoamento subsuperficial foram desprezíveis ou se anularam, não sendo considerados na sua equação. Assim, a equação proposta apresenta a seguinte forma:

$$\Delta A = P + I \pm R \pm Q - ET \quad (13)$$

em que R é escoamento superficial de entrada e saída (mm) e Q é o fluxo vertical de água no solo (mm), que representa ascensão capilar e/ou drenagem profunda.

Esses autores obtiveram a variação do armazenamento (ΔA , mm), por meio da integração dos valores da lâmina de água dos perfis do solo, resultante de dados do conteúdo de água (θ):

$$\int_{n=1}^n \Delta A = A_f - A_i \quad (14)$$

em que A_f e A_i são os valores dos armazenamentos de água acumulados no final e início do período de análise, respectivamente.

Os dados de precipitação pluviométrica (P , mm) foram adquiridos por meio de estações meteorológicas; os de irrigação (I , mm), conforme os valores do regime hídrico adotado para a cultura; os de escoamento superficial (R , mm), por meio da utilização do método Número da Curva, proposto pela SCS-USDA. Tal método é uma representação da condição de solo com uma taxa de infiltração moderada quando totalmente úmido e plantio em fileiras com curvas de nível de boa condição hidrológica (SILVA et al., 2014a).

O fluxo vertical de água no solo (Q , mm), que é representado pela drenagem profunda (DP , mm; sinal negativo) e, ou, ascensão capilar (AC , mm; sinal positivo), foi obtido com base no limite inferior do perfil do solo (profundidade de interesse), utilizando dados do potencial total de água da camada logo acima e abaixo da profundidade de interesse. Assim, foi utilizada a equação proposta por Darcy-Buckingham (LIBARDI, 2005):

$$Q = -K(\theta) \frac{\Delta \psi_t}{\Delta z}$$

(15)

em que $K(\theta)$ ($m \ h^{-1}$) é a condutividade hidráulica do solo e $\Delta \psi_t / \Delta z$ o gradiente do potencial de água no solo entre as camadas acima e abaixo da de interesse.

Estima-se o parâmetro $K(\theta)$, em função do conteúdo de água no solo, usando-se a equação abaixo, calibrada para a profundidade de interesse, pelo do método do perfil instantâneo (LIBARDI, 2005).

$$K(\theta) = K_0 e^{y(\theta - \theta_0)}$$

(16)

em que K_0 é a condutividade hidráulica no solo saturado, θ_0 é o valor da umidade de saturação, ou seja, valores iniciais da condutividade hidráulica e do conteúdo de água no solo, correspondente ao tempo zero de redistribuição; y é coeficiente angular da reta $\ln K$ em função de θ (umidade volumétrica; $cm^3 \ cm^{-3}$).

O gradiente do potencial total de água no solo ($\Delta\psi_t/\Delta z$, $m\ m^{-1}$), entre as camadas acima e abaixo da profundidade de interesse, é estimado pelo potencial total de água no solo (ψ_t), em ambas as profundidades, por meio dos valores do conteúdo de água no solo e da equação abaixo ajustada conforme Dourado Neto et al. (2000).

$$\psi_t = \alpha e^{-\beta\theta} \quad (17)$$

em que α e β são parâmetros adimensionais ajustados, por meio do método do perfil instantâneo, para ambas as profundidades.

Por fim, a evapotranspiração (ET, mm) é quantificada a partir do resíduo da equação do balanço de água no solo. Para o monitoramento do conteúdo de água, foi utilizada uma sonda capacitiva (Diviner 2000 Sentek Pty Ltda., Austrália). Trata-se de um sensor portátil, constituído de um sistema de aquisição de dados que, uma vez inserido em um tubo de acesso instalado no solo, fornece de maneira rápida o conteúdo de água a cada 0,1m (SILVA et al., 2014a).

2.3. Princípios micrometeorológicos

2.3.1. Comprimento de rugosidade (z_0) e deslocamento do plano zero (d)

A rugosidade expõe a força com que a superfície age como sumidouro de momentum, e é definida para estratificação térmica neutra, onde o fluxo vertical de força horizontal não é aumentado ou diminuído por efeitos de flutuabilidade. A descrição da rugosidade da superfície é, comumente, atrelada a dois parâmetros, o comprimento da rugosidade (z_0) e o coeficiente de resistência aerodinâmica (C_D) (WIERINGA, 1993).

Dentro da Camada Limite Interna (CLI) estacionária, adiabática e horizontalmente homogênea com altura h , há interação da velocidade do vento com a rugosidade da cobertura da superfície, resultando em uma tensão cisalhante turbulenta à superfície (WIERINGA, 1993). Para a CLI, existe uma camada de fluxo constante que se subdivide em subcamada inercial (SCI) e, abaixo, a subcamada rugosa (SCR) que é formada quando, muito próxima da cultura, a estrutura turbulenta e a homogeneidade são perturbadas, sendo dependente dos fatores como a distribuição e estrutura das folhas e o espaçamento entre plantas. Sobre essa subcamada, está a subcamada inercial, que no seu interior possui fluxos constantes. Desta foram, a altura e a estrutura da camada

limite são dependentes apenas de escalas como altura e velocidade de atrito (MONTEITH; UNSWORTH, 2013).

No SCI adiabática, o gradiente adimensional do vento (ϕ_m) é um valor unitário e representado por:

$$\phi_m \cong \frac{kz}{u^*} \frac{\partial U}{\partial z} = 1$$

(18)

em que k é a constante de von Karman ($\cong 0,40$); u^* é a velocidade de fricção, e $\partial U / \partial z$ é o gradiente vertical da velocidade horizontal do vento em função da altura z .

Integrando a equação 18, obtém-se:

$$U_z = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)$$

(19)

Este perfil logaritmo do vento define o comprimento da rugosidade (z_o) como uma constante, independente da altura (WIERINGA, 1993).

Lyra e Pereira (2007a) definem z_o como sendo a altura na qual a velocidade horizontal do vento tende a zero, ou seja, é o limite inferior de validade do perfil médio.

Pode ser também caracterizado como uma escala de comprimento que diferencia a superfície em termos de eficiências do processo pelo qual o momentum é removido do fluxo de ar (SHAW; PEREIRA, 1982).

Wieringa (1993) relata que o estabelecimento do limite inferior para SCI está entre 20 a 50 z_o , e para o limite superior em 0,1 e 0,2 h. Sobre uma superfície homogênea, conforme é possível, a extensão da SCI é de alguns metros acima do solo, aproximando-se de 50 a 100 m, dependendo da velocidade do vento e da rugosidade.

O topo da subcamada rugosa (SCR) não é necessariamente o limite inferior da subcamada inercial (SCI), pois o fato de alcançar a homogeneidade horizontal da estrutura do fluxo não garante o gradiente adimensional unitário do vento. Desta forma, pode-se aproximar o desvio em ϕ_m por uma série de potências dependentes da altura (WIERINGA, 1993):

$$\frac{\partial U_z}{\partial z} = \frac{u^*}{kz} \left(1 + c_1 \frac{h}{z} + c_2 \frac{h}{z} + \dots + c_n \frac{h}{z} \right) \quad (20)$$

Se $z \gg h$ (h é a altura do obstáculo), pode-se negligenciar o termo de ordem superior e abreviar $c_1 h \cong d$. Assim:

$$\frac{\partial U}{\partial z} \frac{k}{u^*} \approx \frac{1}{z} \left(\frac{z+d}{z} \right) \approx \frac{1}{z-d} \quad (21)$$

Ao integrar a equação acima, obtém-se:

$$Uz = \left(\frac{u^*}{k} \right) \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right)$$

(22)

em que Uz é a velocidade horizontal média do vento à altura z ; k é a constante de von Karman (0,41); u^* é a velocidade de fricção e z^* é o limite superior da subcamada rugosa (SCR) e d o deslocamento do plano zero (WIERINGA, 1993; LYRA; PEREIRA, 2007a).

Essa é uma introdução empírica do deslocamento do plano zero (d), com uma correção para a forma do perfil logarítmico do vento perto da superfície e proporcional a h . Entretanto, d tem significado físico formal, pois em um dossel denso, com obstáculos cobrindo a superfície, somente uma pequena fração da tensão de cisalhamento da superfície total é levada pra cima pela superfície inferior ($z=0$). A fração restante é levada pelos elementos do dossel, com uma distribuição de arrasto vertical dependente de sua forma. O perfil de velocidade logarítmica tem a sua origem no nível que atua a tensão de superfície do dossel médio que está em $z=0$, se a espessura do dossel não é negligenciável (WIERINGA, 1993).

Para Lyra e Pereira (2007a), d é enfim um escalar empírico para compensar o deslocamento vertical da dissipação de momentum pela superfície com obstáculos.

O formato aleatório de uma superfície vegetada possibilita a entrada dos ventos entre as plantas, agindo como uma superfície permeável. Teoricamente, a equação 22 mostra que $Uz = 0$ na altura $z=d+z_0$, ou seja, para o vento, é como se a superfície do solo tivesse sido deslocada para altura d . Assim, esta nova altura de referência é menor que a altura média das plantas (PEREIRA et al., 2013).

Métodos “gráfico” e “analítico” são utilizados para a obtenção dos valores de z_0 e d , determinados por meio de ajustes da velocidade horizontal média do vento à altura z (Uz) (equação 22) (TOLEDO FILHO et al., 2003; LYRA; PEREIRA, 2007ab).

Toledo Filho (2001) apresenta esses métodos, sendo que, no analítico, os valores de z_0 são determinados por meio de regressão linear, aplicando-se uma equação logarítmica do tipo $Y = a + b \ln z$, com dois parâmetros, onde Y é a velocidade do vento medida nas diferentes alturas como variável dependente, e X o logaritmo natural da altura z como variável independente. Desta foram, obtêm-se as seguintes relações:

$$z_0 = \exp\left(\frac{-a}{b}\right)$$

(23)

em que

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}$$

(24)

$$b = \frac{\sum XY - \bar{X}\sum Y}{\left[\frac{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}}{n} \right]}$$

(25)

Já para o deslocamento do plano zero (d), este é obtido descontando-se o valor numérico de cada ponto da altura z, onde a curva do perfil da velocidade do vento passa a ser uma reta, com valor máximo de R².

Por sua vez, o método gráfico, considerado como convencional para a determinação dos parâmetros z₀ e d, é realizado por meio de processo de tentativas relacionadas à velocidade do vento em função do ln(z - d). Assim, há em sequência uma minimização do somatório dos quadrados dos desvios entre os valores observados e estimados da velocidade do vento nos diferentes níveis, por meio de valores dados para d até linearizar o perfil do vento. Portanto, ao lineariza-se a reta, d é determinado e z₀ será encontrado pela interceptação da reta com a ordenada Y do gráfico.

Agora para Allen et al. (1998), esses parâmetros podem ser obtidos de forma mais simples, utilizando-se o comprimento de rugosidade (z₀, m):

$$z_0 = 0,1 z_{0m}$$

(26)

em que z_{0m} é comprimento de rugosidade da transferência de domínio de momentum (m).

Tanto o comprimento de rugosidade da transferência de domínio de momentum (z_{0m}, m), quanto o deslocamento do plano zero (d, m), em grande número de espécies, pode ser calculado a partir da altura da cultura (h, m), pelas seguintes equações:

$$d = 2/3h$$

(27)

$$z_{om} = 0,123h$$

(28)

Silva et al. (2012) citam a equação de Monteith e Unsworth (1990) para a determinação do comprimento de rugosidade da transferência de domínio de momentum (z_{om}):

$$Z_{om} = \frac{z - d}{\exp\left(\frac{k U_z}{u^*}\right) + \Psi_m\left(\frac{z - d}{L_{M-O}}\right)}$$

(29)

em que LM-O é comprimento de Monin-Obukhov (adimensional), k = constante de Von Karman (0,41), ψ_m é fator de correção da estabilidade atmosférica para o momentum (adimensional).

Por sua vez, Pereira et al. (2013) determinam os parâmetros z_o e d , considerando também informações da altura média das plantas (h , m):

$$z_o = a h$$

(30)

$$d = 0,67h$$

(31)

em que o valor mais razoável para a é 0,10.

2.3.2. Fetch (Bordadura)

O fetch trata-se da distância horizontal (bordadura) que é percorrida pelo vento sobre a superfície, determinando o limite superior de validade do perfil do vento, que é influenciado pela rugosidade da superfície (MONTEITH; UNSWORTH, 1990).

Se a superfície do terreno possui variação da rugosidade ao longo de uma distância x do fetch, na direção predominante do vento, o perfil de vento só estará relacionada com a rugosidade do terreno dentro da camada limite interna com altura limitada $\delta(X)$, enquanto que a estrutura dos ventos, em níveis mais elevados, será determinada pela aspereza na direção do vento predominante a distâncias $>x$ (WIERINGA, 1993).

Nas observações de campo, a sua generalização só pode ser aplicada se todos os níveis de observação estiverem dentro de uma subcamada inercial, onde a estrutura é determinada quase completamente pelo tipo de superfície estudada. Inicialmente, é necessário que o nível mais baixo de observação esteja a uma altura $\geq 20 z_0$ (comprimento de rugosidade) acima da superfície de referência. Mas a medição no nível superior e a estrutura de vento ainda devem ser acuradas pela mesma rugosidade homogênea, e isto, atribui um limite superior de observação se o fetch homogêneo é finito (WIERINGA, 1993).

Wieringa (1993) cita duas abordagens analíticas que são comumente usadas para determinação de $\delta(X)$. A primeira foi iniciada por Elliott (1958), e se baseia na equivalência de parâmetros de fluxo a sotavento e a barlavento com a mudança da rugosidade. Enquanto que a segunda abordagem, descrita por Miyake (1965), é fundamentada na analogia da difusão a favor do vento de uma “pluma de poluentes”, a partir de uma fonte da superfície, tendo a vantagem de contar a favor da direção do vento.

O modelo de Elliott (1958) expresso por:

$$\delta(X) = 0,1 z_0^{0,2} X^{0,8}$$

(32)

E o modelo de Miyake, é representado por:

$$\frac{X}{z_0} = \left(\frac{\delta}{z_0} \left[\ln \frac{\delta}{z_0} - 1 \right] + 1 \right) / \left(k \frac{\sigma_w}{u_*} \right)$$

(33)

em que σ_w é o desvio-padrão de componentes de turbulência vertical; $K \cong 0,40$, $\sigma_w / u_* \cong 1,25$ e o valor do denominador é 0,5.

A maior parte da camada inferior abaixo de $\delta(X)$ é uma camada de transição, onde o gradiente adimensional da velocidade do vento (ϕ_m) é diferente de 1 ($\phi_m \neq 1$); variando entre 0,5 e 1,5, conforme a altura, fetch e tipo de alteração da superfície contra o vento (PETERSON, 1969).

Próximo ao equilíbrio dos fluxos de adaptação, a rugosidade na direção predominante do vento ocorre em níveis inferiores a $0,1 \delta(X)$, sendo a maior altura aceitável para observações utilizadas na determinação da rugosidade do terreno (WIERINGA, 1993), ficando essa altura definida como o topo da subcamada inercial (SCI) (LYRA, 2005).

Aplicando-se a equação 33 e substituindo $\delta = 10 z$, obtém-se:

$$X = 2 z_0 \left(\frac{10z}{z_0} \left[\ln \frac{10z}{z_0} - 1 \right] + 1 \right)$$

(34)

A equação 34 é necessária para assegurar que um determinado nível de medida do perfil Z esteja ainda na camada de equilíbrio (subcamada inercial), totalmente adaptada à rugosidade z_0 a barlavento.

Em relação à validade da equação 34 para $z_0 \cong 0,1$ m, esta indica a regra dos fetchs serem 100:1 entre a bordadura e a altura acima da superfície em cultura (WIERINGA, 1993).

Rosenberg et al. (1983) destacaram também que um bom resultado pode ser obtido para a estimativa dos fluxos se a relação de bordadura e altura dos sensores for maior que 100:1. Entretanto, Heilman et al. (1989) sugeriram uma relação pequena para a aplicação do método de Bowen, que foi utilizado com sucesso por meio de um fetch de 20:1.

2.3.3. Footprint

O footprint de uma medição de fluxo descreve a área de fonte do lado do vento que contribui para o fluxo detectado por instrumentos em um ponto de medição. Especificamente, footprint define a possibilidade de que uma contribuição de fluxo originário de um ponto partícula contra o vento vai ser detectado no ponto de medição

(MONTEITH; UNSWORTH, 2013). Assim, footprint decide a conjuntura espacial da medição, onde são instalados os sensores de fluxo turbulento que tem, geralmente, o objetivo de aferir os sinais que refletem a influência da superfície subjacente nas trocas turbulentas (SCHMID, 2002).

É importante que o footprint real, que influencia os sensores de fluxo montados na torre, seja homogêneo e de larga escala para impedir que a advecção horizontal e a divergência vertical possam interferir no fluxo da superfície de interesse (DABBERDT et al., 1993).

Não é um problema a localização exata de um sensor ao longo de uma superfície homogênea, isso porque os fluxos de qualquer parte da superfície, por definição, são iguais. Entretanto, se a superfície em questão não é homogênea o sinal medido é dependente da parte da superfície que possui a maior influência sobre os sensores, e deste modo sobre a localização e o tamanho do footprint (SCHMID, 2002).

Muitos modelos de difusão têm sido úteis na interpretação dos fluxos dentro e acima dos dosséis pela quantificação footprint de fluxo, explicando como a variação espacial de fontes de barlavento e sumidouros contribuem para o fluxo medido (MONTEITH; UNSWORTH, 2013).

Schmid (2002) revisou e identificou que o footprint de fluxo, em medições acima do dossel, pode ser quantificado com confiabilidade por meio dos modelos Eulerian ou de difusão Lagrange, proporcionando um maior entendimento das relações existentes entre a área de origem e altura de medição, do que a regra do requisito do fetch. Já para dentro dos dosséis, os cálculos são mais complicados, devido às escalas de velocidade, tempo e comprimento serem mais homogêneas e muito diferentes da situação acima da copa.

2.4. Interação biosfera-atmosfera (acoplamento e desacoplamento)

A diferença da quantidade de vapor de água entre uma superfície vegetada e a atmosfera está entre os componentes mais importantes da interface biosfera-atmosfera no processo de troca de energia (KUMAGAI et al., 2004), caracterizando como um evento de destaque no balanço de energia na superfície (SILVA et al., 2011).

Essa transferência de água na fase de vapor é regulada predominantemente pelos estômatos. A vaporização acontece nos espaços intercelulares, dependentes do suprimento de energia, gradiente de pressão do vapor e da velocidade do vento, além de

também ser influenciada pelas características das plantas, aspectos ambientais e práticas de cultivo (ALLEN et al., 1998).

A habilidade que a superfície vegetada tem para transferir vapor de água para atmosfera pode ser avaliada utilizando o fator de desacoplamento (Ω). McNaughton e Jarvis (1983) propuseram uma metodologia para melhor entendimento desse evento:

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

(35)

em que γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Δ é a tangente da curva de pressão de saturação de vapor d'água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); r_a e r_s são as resistências aerodinâmica e da superfície (s m^{-1}), respectivamente.

A resistência a superfície (r_s , s m^{-1}) pode ser obtida por meio da inversão da equação de Penman-Monteith (MONTEITH; UNSWORTH, 1990):

$$r_s = r_a \left(\frac{\Delta}{\gamma} \frac{H}{LE} - 1 \right) + \left(\frac{\rho C_p (e_s - e_a)}{\gamma LE} \right)$$

(36)

em que H é o fluxo de calor sensível ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ou W m^{-2}); LE é o fluxo de calor latente

($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ou W m^{-2}); ρ_a é a densidade do ar (kg m^{-3}); C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($\text{J kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$) e $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor d'água (kPa).

Para a determinação da resistência aerodinâmica (r_a , s m^{-1}), a mesma pode ser obtida por (ALLEN et al., 1998; GUERRA; SLACK, 1996; ORTEGA-FARIAS et al., 2006):

$$r_a = \frac{\ln \left(\frac{z_m - d}{z_{om}} \right) \ln \left(\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right)}{k^2 u_z}$$

(37)

em que z_m é a altura de medição dos valores de velocidade do vento acima do dossel da cultura (m); z_h é a altura de medição da umidade (m); d é o deslocamento do plano zero (m); z_{om} é o comprimento de rugosidade da transferência de domínio de momentum (m); z_{oh} é comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor entre a superfície e a atmosfera, determinado por $z_{oh} \text{ é } 0,01z_{om}$; k é a constante de von Karman (0,41), u_z é a velocidade do vento na altura (z).

Pode também ser obtido pela seguinte equação:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z-d}{z_{oh}}\right) - \psi_h}{k u^*}$$

(38)

em que z é a altura de medição dos valores de velocidade do vento acima do dossel da cultura (m); d é o deslocamento do plano zero (m); z_{oh} é o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor entre a superfície e a atmosfera (m); k é a constante de von Karman (0,41); u^* é a velocidade de fricção ($m s^{-1}$); ψ_h é fator de correção da estabilidade atmosférica para transferência de calor sensível, adimensional.

Dependendo dos dados disponíveis, o fator de desacoplamento também pode ser determinado pelas condutâncias aerodinâmicas (C_a , $m s^{-1}$) e da superfície (C_s , $m s^{-1}$) (SOUZA FILHO et al., 2005):

$$\Omega = \frac{1}{1 + \left[\frac{\gamma}{\gamma + \Delta} \right] \left(\frac{C_s}{C_a} \right)}$$

(39)

A condutância da superfície (C_s) é determinada pela inversão da equação de Penman-Monteith (SHUTTLEWORTH, 1988), expressa por:

$$C_s = \left[\frac{\rho_{ar} C_p (e_s - e_a)}{\gamma LE} - \frac{1}{C_a} \left(\frac{\Delta H}{\gamma LE} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (40)$$

em que C_s é a condutância da superfície (mesmo que o inverso da resistência da cultura (r_s), $m s^{-1}$), ρ_{ar} é a densidade do ar ($Kg m^{-3}$) e $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor d'água.

Já para a determinação da condutância aerodinâmica (C_a), será utilizada a expressão proposta por Campbell e Norman (1998):

$$C_a = \frac{k^2 u^*}{\left[\ln\left(\frac{z-d}{z_o} + \psi_m\right) \right] \left[\ln\left(\frac{z-d}{z_o} + \psi_h\right) \right]} \quad (41)$$

em que C_a é condutância aerodinâmica (mesmo que o inverso da resistência aerodinâmica (r_a), $m s^{-1}$), z é a altura de medição dos valores de velocidade do vento acima do dossel da cultura (m), k é a constante de von Karman (0,41), z_o é a comprimento da rugosidade da transferência de domínio de calor e vapor d'água entre a

superfície e a atmosfera (m), d é o deslocamento do plano zero (m), u^* é a velocidade de fricção do ar na altura (z), ψ_m e ψ_h são os fatores de correção para fluxo de momentum e fluxo de calor sensível, respectivamente.

Os fatores de correção para o fluxo de momentum (ψ_m) e de calor sensível (ψ_h) podem ser também determinados por (SOUZA FILHO et al., 2005; LYRA; PEREIRA, 2007a):

– Para atmosfera estável ($\zeta \geq 0$):

$$\Psi_m = \Psi_h = 6 \ln \left(1 + \frac{\zeta}{z} \right) \quad (42)$$

– Para atmosfera instável ($\zeta < 0$):

$$\Psi_h = -2 \ln \left[\frac{1 + \sqrt{1 - 16 \zeta T_k^2}}{2} \right] \quad \Psi_m = 0,6 \Psi_h \quad (43)$$

em que ζ é o parâmetro de estabilidade atmosférica.

O parâmetro de estabilidade atmosférica (ζ) é definido por:

$$\zeta = - \frac{0,4 g z H}{\rho C_p T_k u^{*3}} \quad (44)$$

em que g é a aceleração gravitacional ($9,8 \text{ m s}^{-1}$), z é a altura de medição do vento (m); H é o fluxo de calor sensível ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); T_k é a temperatura do ar (K); ρ é a massa específica do ar (kg m^{-3}), c_p é o calor específico do ar úmido à pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

A amplitude do fator de desacoplamento (Ω) varia no intervalo de 0 a 1 ($0 < \Omega < 1$), sendo que valores próximos ou iguais a 0 indicam que a transpiração vegetal depende do controle dos estômatos. Neste caso, as características atmosféricas de vento e umidade executam um controle maior sobre a transferência de vapor d'água para a atmosfera, uma vez que a evapotranspiração ocorrerá apenas se existir um alto déficit de pressão de vapor e uma baixa resistência aerodinâmica, considerando, assim, que superfície vegetada está “acoplada com a atmosfera”. Já para os valores do fator de desacoplamento próximos de 1, a transpiração está mais sensível ao saldo de radiação solar. Neste caso, o fluxo de vapor d'água é dificultado pela saturação do ar e a maior contribuição ao processo de evapotranspiração se deve à entrada de radiação. Para esta

situação, considera-se que a superfície está “desacoplada com a atmosfera” (McNAUGHTON; JARVIS, 1983; SILVA et al., 2012).

2.5. Evolução morfoestrutural da palma forrageira

A compreensão do comportamento de indicadores morfológicos e estruturais das plantas proporcionam o conhecimento e a definição das épocas em que ocorrem as diversas fases fenológicas, facilitando, assim, a escolha das melhores práticas culturais a serem adotadas (LARCHER, 2000).

A aplicação de análises de crescimento para aquisição de informações sobre as plantas, como entidade biológica, possibilita o manejo racional das espécies cultivadas, afim de que expressem o seu potencial de produção. Além disso, permiti aferir o crescimento das plantas como um todo e a contribuição dos seus diferentes órgãos. Assim, a partir de dados de crescimento é possível estimar as causas de variações do desenvolvimento de diferentes plantas ou entre plantas semelhantes em ambientes diferentes (ANDRADE et al., 2009b).

Para o seu crescimento, as plantas captam energia luminosa por meio de processo fotossintético, reduzindo o CO₂ atmosférico a compostos orgânicos essenciais à manutenção de sua biomassa, bem como à formação de novos tecidos (LARCHER, 2000; TAIZ; ZEIGER, 2013; LIGUORI et al., 2013). Desta forma, elas acumulam biomassa durante o seu crescimento segundo a curva sigmoideal, na qual inicialmente se observa um crescimento exponencial, prosseguida por uma fase de ganhos lineares e pôr fim a fase de incrementos decrescentes. Este padrão da curva decorre do balanço entre disponibilidade e demanda de carbono das espécies, tendo os fatores de meio e de manejo um importante papel no condicionamento das características morfogênicas e estruturais do dossel, determinando assim o acúmulo de biomassa (GOMIDE et al., 2003).

As características estruturais das plantas são fatores preponderantes para o comportamento dos indicadores morfogênicos das culturas. Afim de compreender essas propriedades estruturais e as respostas em diferentes cultivares de palma forrageira (*Opuntia* spp. *Nopalea* spp.) ao ambiente de cultivo, Silva et al. (2010) realizaram uma pesquisa com 50 cultivares no município de Caruaru, PE, analisando as características morfológicas nas plantas e nos cladódios sobre a produção de matéria seca, por meio de medições biométricas.

Uma das características morfológicas que é sempre observada na maioria das culturas é a área foliar, que é uma característica morfogenética de grande importância para interceptação dos valores da fração da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), a qual depende do número e do tamanho das folhas, do seu tempo de permanência na planta, condições edafoclimáticas e da densidade populacional, entre outros fatores (MONTEIRO et al., 2005). Esse coeficiente pode ser obtido por métodos diretos que realizam as medidas nas folhas usando equipamentos eletrônicos e análise planimétrica (SILVA et al., 2014b) e por métodos indiretos, que estimam a área foliar a partir da correlação de medidas simples e não destrutivas da folha (CARVALHO et al., 2011; ALONZO et al., 2015). Essas medições podem ser repetidas durante o período de crescimento, reduzindo o erro experimental associado a procedimentos amostrais destrutivos (LOPES et al., 2007).

Na cultura da palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.), os cladódios são as estruturas responsáveis pelo processamento da radiação na produção de carboidratos e de biomassa seca (LIGUORI et al., 2013; PINHEIRO et al., 2014), uma vez que os mesmos possuem o clorênquima verdejante que contém clorofila onde ocorre a fotossíntese (NOBEL, 2001; BLACK; OSMOND, 2003). Assim, utiliza-se o índice de área de cladódio (IAC, equivalente ao índice de área foliar) para analisar a interceptação de radiação fotossintética por essa cultura. Este índice é obtido pela relação entre a área total dos cladódios e a área que a planta ocupa no solo (SILVA et al., 2014b), variável com o tipo de gênero, cultivar e condição de cultivo (DUBEUX JÚNIOR et al., 2006), além de apresentar diferentes morfologias de emissão, tamanho, formato e distribuição dessas estruturas (PINHEIRO et al., 2014).

O índice de área do cladódio pode ser obtido por meio da determinação da área do cladódio, por meio do escaneamento dos artigos, onde as imagens geradas serão processadas em programas computacionais, tipo o programa Lafore (Veiko Lehsten, Landscape Ecology Group, University of Oldenburg, Oldenburg, Alemanha), que irá classificar a área com base na tonalidade esverdeada da imagem. Com os valores obtidos de área do cladódio, pelo escaneamento, será então possível acrescentá-los ao cálculo do índice de área do cladódio (IAC, $m^2 m^{-2}$) para cada planta selecionada, em que:

$$IAC = \left(\frac{\sum_{i=1}^n AC}{n} \right) / 10000 / (E1 \times E2)$$

(44)

em que 10.000 é o fator de conversão de cm² para m²; e E1×E2 é o espaçamento entre fileiras e plantas (PINHEIRO et al., 2014).

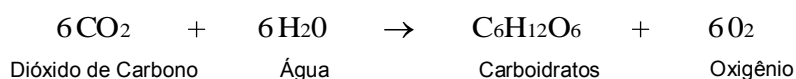
A área dos cladódios (AC), para algumas cultivares, também pode ser estimada de acordo com as equações propostas por Silva et al. (2014b), que calibraram modelos lineares, exponencial e de Gompertz, a partir de dados biométricos das plantas.

2.6. Peculiaridade de agroecossistema de plantas de metabolismo ácido das crassuláceas (MAC) e suas relações com o ambiente de cultivo

A denominação metabolismo ácido das crassuláceas (MAC) é devido ao fato de ter sido, primeiramente, identificado em plantas da família das crassuláceas. O termo ácido foi empregado por causa da via que se individualiza por um acúmulo de ácidos orgânicos C4 durante a noite, e consumo do mesmo durante o dia. Este metabolismo CAM está contido em muitas plantas suculentas, como, por exemplo, nas famílias *Agavaceae*, *Bromeliaceae*, *Cactaceae*, *Crassulaceae*, *Euphorbiaceae* e *Orchidaceae* (PIMENTEL, 1998).

Espécies de metabolismo fotossintético MAC fecham os seus estômatos durante o dia, evitando a perda de água e abrem durante a noite, quando há um baixo déficit de pressão de vapor d'água, diminuindo a perda de água para o ambiente. Essas plantas apresentam uma alta eficiência no uso da água (kg de água/ kg de matéria seca), quando comparada às de metabolismo fotossintético C3 (ciclo de Benson-Calvin) e C4 (Via de Kortschack, Hatch-Slack) (LARCHER, 2000; NOBEL, 2001; BISPO et al., 2007; CONSOLI et al., 2013).

Para os diferentes tipos de metabolismo fotossintético, a fotossíntese é um processo que aproveita e é dependente da energia solar. Os organismos fotossintéticos utilizam a energia proveniente do sol para sintetizar compostos carbonados, em que a energia luminosa conduz a síntese de carboidratos por meio do dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O), com a liberação de oxigênio (O₂). Assim, as plantas utilizam essa energia para oxidar a água, liberando o oxigênio e reduzindo o dióxido de carbono, fato que produz grandes compostos de carbono, sobretudo açúcares (TAIZ; ZEIGER, 2013):



Especificamente o metabolismo fotossintético das plantas MAC, em relação às plantas C3 e C4, exibe um mecanismo diferente de concentração de CO₂ no sítio da rubisco (ribulose 1,5-bifosfato carboxilase oxigenase). Nessas plantas, a captura inicial e incorporação do CO₂ atmosférico em esqueletos de carbono estão espacialmente próximos. Entretanto, eles estão temporariamente fora de fase, por aproximadamente 12 horas em um ciclo de luz e escuro de 24 horas (TAIZ; ZEIGER, 2013).

As alterações na taxa de captura de carbono e regulação enzimática durante 24 horas ao longo do ciclo das plantas CAM são divididas em quatro fases: 1ª fase ocorre à noite; 2ª fase no início da manhã; 3ª fase ao longo do período diurno e a 4ª fase no final da tarde. Durante a 1ª fase (noite), os estômatos estão abertos e as folhas estão respirando, o CO₂ é capturado e estocado como malato no vacúolo, onde a PEPcase domina a captura de CO₂. Na 3ª fase (dia), os estômatos estão fechados e as folhas estão fotossintetizando e o malato estocado é descarboxilado, resultando em altas concentrações de CO₂ ao redor do sítio ativo da rubisco, conseqüentemente, aliviando os efeitos adversos da fotorrespiração. A 2ª (início da manhã) e 4ª fases (final da tarde) são intermediárias e alteram o metabolismo em preparação para a 1ª e 3ª fases, respectivamente. Na 2ª fase, a atividade da rubisco aumenta, porém, diminui na 4ª fase. Já as atividades da PEPcase se comportam de maneira contrária nessas duas fases. A separação temporal do ciclo de carboxilação e descarboxilação reduz a ineficiência da rubisco e otimiza o uso da água, melhorando a performance fotossintética em ambientes que possuem características limitantes (TAIZ; ZEIGER, 2013).

As características ambientais, como a quantidade de água disponível, temperatura do ar, luz, CO₂, entre outros fatores, podem ser componentes limitantes para o desenvolvimento das plantas MAC e, conseqüentemente, a sua eficiência fotossintética e condutância estomática.

Nobel (2001), verificando o comportamento de plantas representativas e altamente produtivas dos tipos C3 e C4, além da *Opuntia ficus-indica* (palma forrageira), espécie de metabolismo CAM, quanto as suas repostas a perda diária de água e a captação atmosférica de CO₂ durante dias claros de verão, com temperaturas máximas do ar de 30° a 35°C e temperaturas mínimas noturnas do ar de 15° a 20°C, constatou que a abertura noturna dos estômatos das plantas MAC é o fator primordial para a conservação de água. Nesse período, ocorrem temperaturas menores do que

durante o dia, havendo uma menor perda de água por transpiração, por causa da redução da diferença do teor de vapor d'água entre as plantas e o ar que as circunda. Assim, observou-se que a *Opuntia ficus-indica* transpirou 11,3 mols (203 g) de água por m² de superfície, enquanto que as plantas C4 e C3 podem perder de 2,9 e 4,7 vezes a mais, respectivamente, durante um período de 24 horas. Com relação a captação atmosférica diária de CO₂, as espécies apresentaram comportamento semelhantes nas suas perdas diárias de água, com alta absorção no período diurno para as C3 e C4, e baixa para a espécie MAC, com conduta inversa durante o período noturno e uma significativa absorção da espécie MAC.

Há situações em que as plantas MAC também podem abrir seus estômatos durante o dia, e a fotossíntese C3 ocorre até a escuridão (BLACK; OSMOND, 2003). Em condições de boa disponibilidade hídrica isso poderá ocorrer, pois essas plantas geralmente absorvem algum CO₂ pela manhã e no final da tarde, enquanto que as plantas C3 e C4 não absorvem durante o período noturno (NOBEL, 2001).

A disponibilidade de água é sem dúvida um regulador dessa fixação de CO₂ durante o dia na *Opuntia ficus indica*. No cultivo em vasos dessa espécie, os saldos de absorção de CO₂ na luz e no escuro são positivos e de magnitudes semelhantes até que ocorra um estresse hídrico, provocando um ligeiro declínio da fixação de CO₂ na luz, acompanhada por um forte aumento contínuo durante o escuro. No entanto, quando ocorrer novamente uma condição de disponibilidade hídrica, existirá uma restauração das raízes, com um aumento substancial de absorção de CO₂ à luz e uma redução no escuro (WINTER et al., 2008).

Na *Opuntia ficus indica*, é possível também que haja uma absorção de CO₂ na luz que exceda a do escuro. Porém, também irá diminuir essa relação, conforme o aumento do estresse hídrico, havendo uma aceleração da fixação noturna. Assim, quando novamente ocorrer uma condição de disponibilidade hídrica, o aumento diário na captação de CO₂ no escuro volta para as taxas observadas antes da imposição do estresse, o que demonstra um comportamento facultativo essa espécie (WINTER et al., 2008).

A fixação do CO₂ durante a noite pelas plantas MAC para a formação do ácido málico, armazenado nos vacúolos das células, pode ser alterado com o estresse hídrico, provocando uma diminuição do acúmulo desse ácido. Dessa forma, a acidez diminui com o aumento do déficit de água no solo, que é consequência de uma menor abertura estomática e menor absorção de CO₂ (ACEVEDO et al., 1983; BLACK; OSMOND,

2003). Essa alteração na acidez diurna pode apresentar diferentes condutas ao longo da estrutura da planta, tendo nos cladódios maduros(seis meses de idade) uma diminuição conforme o estresse hídrico. No entanto, nos órgãos jovens (botões de flores e duas semanas de idade dos cladódios)ocorre uma neutralidade, não exibindo flutuações dessa acidez, o que reflete, presumivelmente, em metabolismo fotossintético C3 dessas estruturas (ACEVEDO et al.,1983).

Embora a palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*) resista a situações de seca, essa situação também afeta a sua relação fonte-dreno, principalmente porque a absorção do CO₂ líquido diário pelo cladódio mãe (cladódio que foi plantado no solo e que irá originar os demais) é expressivamente reduzida com o aumento no número de cladódios filhos. Essa relação, condicionada pelos cladódios filhos em condições de solo seco, afeta os procedimentos das fases MAC no cladódio mãe, diminuindo a absorção de CO₂ na fase 4 (final da tarde) e o ganho de carbono nas fases 1 e 2 (noite e início da manhã). Assim, o estresse hídrico proporciona redução no teor relativo de água do cladódio mãe, por causa da alta demanda do potencial hídrico dos cladódios filhos, além de reduzir também a captação de CO₂ por essas e por outras estruturas (PIMIENTA-BARRIOS et al., 2005).

Liguori et al. (2013) observaram que, em situações de cultivo irrigado, essa cultura pode dobrar a captação total de CO₂ líquido diário, mas não constataram alteração em plantas de sequeiro. Portanto, o padrão de captação líquida de CO₂ não se altera com o conteúdo de água no solo e plantas bem irrigadas têm taxas de assimilação mais elevadas.

Outro efeito provocado pela escassez hídrica écom relação ao seu padrão de condutância estomática. Para a *Opuntia ficus-indica*, com o aumento nos dias de seca, ocorre um atraso na abertura estomática no início do período noturno e uma diminuição na condutância máxima do vapor de água durante a noite. Por sua vez, a abertura dos estômatos observada ao amanhecer e a condutância máxima de vapor de água neste momento são pouco influenciadas pelo estresse hídrico (ACEVEDO et al., 1983).

A inicialização das investigações para a compreensão dos padrões de condutância estomática das plantas MAC foi realizada a partir de estudos de análise de gás infravermelho, combinado com análises de gás de resistência difusiva, que conseguiram identificar o padrão diário dessa condutância. Esta segue de perto a curva de fixação de CO₂, isto é, os estômatos estão abertos durante a noite e hermeticamente fechados durante a maior parte do dia. Foi constatado também que, mesmo quando os

estômatos estão abertos na luz ou escuro, as condutâncias estomáticas nessas plantas são muitas vezes menores do que das plantas C3. Além disso, o fechamento dos estômatos, durante os mais intensos níveis de radiação diárias da fase III, explica nitidamente o uso eficiente de água durante a fotossíntese nessas plantas. Além disso, todas as análises de resistência difusiva dos tecidos das MAC mostraram o controle eficiente de trocas gasosas por seus estômatos em cada ritmo diário (BLACK; OSMOND, 2003).

Existe também, para a *Opuntia ficus-indica*, uma variação do comportamento médio da condutância estomática nas diferentes estações do ano. Assim, ocorre uma diminuição gradual na estação do verão no hemisfério norte, época chuvosa com reduzida disponibilidade de fluxo de fótons fotossintéticos, devido à nebulosidade, até a estação do inverno, momento que ocorre níveis mais baixos de nebulosidade com temperaturas do ar moderadas. Em sequência, há um aumento dessa condutância na estação da primavera, devido ser um período de seca e com temperaturas elevadas (PIMIENTA-BARRIOS et al., 2000), cuja causa fundamental de variação está na disponibilidade de radiação solar ao longo do ano para a cultura.

A radiação solar é sem dúvida a principal fonte de energia para a produção vegetal, onde o conhecimento e a determinação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) acima do dossel é essencial para a compressão de inúmeros processos fisiológicos nas plantas. Para fins fisiológicos, essa radiação é denominada de densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (FFF) (STEIDLE NETO et al., 2008).

Na *Opuntia ficus indica*, a RFA influencia consideravelmente na absorção noturna de CO₂ e na condutância de vapor d'água. Nobel e Hatsock (1983) observaram que há uma influência mais significativamente quando a RFA foi de 560 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, em comparação a sua resposta a 90 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Na situação de RFA superior (560 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), a abertura substancial dos estômatos (condutância do vapor d'água) e a absorção de CO₂ ocorreram durante a maior parte da noite. Por outro lado, na situação de RFA inferior (90 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), os estômatos nunca estão abertos amplamente e a captação líquida de CO₂ ocorreu apenas cerca de 2 horas. Nessa situação, a taxa máxima de absorção de CO₂ e a condutância máxima do vapor d'água foram de apenas 5% e 13%, respectivamente, da magnitude da taxa máxima de RFA superior.

Nas plantas MAC, a maior parte da captação atmosférica do CO₂ ocorre durante a noite, quando o FFF instantâneo é zero e, portanto, não é possível a fotossíntese. Em contraste nas plantas tipo C3 e C4, a captação atmosférica do CO₂ ocorre juntamente com a absorção de luz e a fotossíntese durante o dia. Além disso, a

luz não pode passar pelos cladódios como acontece nas folhas finas de plantas C3 e C4. Portanto, ambos os lados atuam como superfícies independentes, em que a sua posição deve ser considerada em relação à trajetória do sol. Desta forma, para os cladódios que têm uma orientação favorável com relação ao aproveitamento dos FFF, a captação atmosférica do CO₂ é maior do que os que estão em sombra (NOBEL; HATSOCK, 1983; NOBEL, 2001).

A quantidade de RFA interceptada pela palma forrageira também pode influenciar a sua acidez. Acevedo et al. (1983) observaram que o aumento da RFA diária total de 3,5 para 36 mol m⁻² dia⁻¹ faz com que a acumulação noturna de ácido aumente de 0,11 para 0,64 mol m⁻² dia⁻¹.

Outro componente do ambiente que deve ser levado em conta, principalmente devido às mudanças climáticas, é a elevação do CO₂. O aumento desse elemento eleva significativamente a absorção de CO₂ pela *Opuntia ficus-indica* (CUI et al., 1993), como também estimula o crescimento dessa cultura (CUI; NOBEL, 1994). Porém, ainda não se sabe até que valores de CO₂ no ambiente são favoráveis.

No ambiente de cultivo das plantas MAC, também é importante considerar os valores de temperatura do ar, devido ser outro elemento meteorológico que influencia significativamente nos processos fisiológicos das plantas, por meio da cinética das reações químicas e das atividades das muitas enzimas. Com relação ao processo de fotossíntese, esse elemento influencia nas reações dependentes da radiação, transporte de elétrons e nos processos secundários. Assim, os processos de fixação e redução do CO₂ ocorrem lentamente em baixas temperaturas e aumentam até um valor ótimo. Nas plantas MAC, a temperatura ótima durante a fase clara é alta e, durante a fase de fixação de CO₂ (à noite), se ajusta às baixas temperaturas noturnas (LARCHER, 2000).

A temperatura das células do clorênquima no gênero *Opuntia*, onde ocorre a fixação inicial do CO₂ e a eventual síntese de produtos da fotossíntese, está geralmente na faixa de 1°C acima ou abaixo da temperatura da superfície do cladódio, que é influenciada por muitos fatores (a temperatura localizada do ar; a velocidade localizada do vento, a incidência de luz, sombreamento, nebulosidade, entre outros). A temperatura do ar noturna, por sua vez, é a mais importante para o conhecimento da captação atmosférica do CO₂ nas *Opuntias*, isto devido a sua maior captação que ocorre nesse horário (NOBEL, 2001). Durante o período noturno, as temperaturas moderadas favorecem a atividade da PEPCase e a absorção de CO₂ pelas plantas MAC (ISRAEL; NOBEL, 1995).

Nobel e Hartsock (1984) verificaram que a absorção noturna de CO₂, para a *Opuntia ficus-indica*, foi máxima sob temperaturas de crescimento próximas de 25°C/15°C (dia/noite), diminuindo rapidamente com o aumento da temperatura. A abertura estomática, que essencialmente ocorreu apenas à noite, foi medida por mudanças na condutância de vapor d'água, reduzindo progressivamente com a elevação da temperatura média. Esses autores também destacaram que a temperatura ótima de absorção de CO₂ líquido desloca-se para baixo quando as plantas estão sob condições de seca. Este fato reflete, possivelmente, em um aumento da importância fracionada da respiração em temperaturas mais elevadas durante a seca. Em média, as temperaturas noturnas se situam acima de 5°C e abaixo de 20°C para a captação atmosférica do CO₂ pela palma forrageira, quando a água do solo não é um fator limitante (NOBEL, 2001).

3. CONCLUSÕES

Estudos micrometeorológicos em superfícies vegetadas possibilitam compreender a dinâmica dos fluxos e a transferência de vapor d'água no sistema solo-planta-atmosfera. Essas investigações, aplicadas em áreas com o cultivo da palma forrageira, poderão auxiliar na compreensão do seu comportamento, além de melhorar o seu manejo, uma vez que essa espécie possui o metabolismo fotossintético MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas). O metabolismo MAC proporciona um comportamento diferenciado da abertura estomática, o qual poderá ser influenciado pelas condições meteorológicas reinantes no ambiente em que ela foi inserida.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, E.; BADILLA, I.; NOBEL, P.S. Water relations, diurnal acidity changes, and productivity of a cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. **Plant Physiology**, v.72, p.775-780, 1983.

AHRENS, C.D. **Essentials of meteorology**: an invitation to the atmosphere. 3.ed. Belmont: Thomson Brooks Cole, 2000. 463 p.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMUTH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome, Itália: FAO, 1998. 301p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALONZO, M.; BOOKHAGEN, B.; McFADDEN, J.P.; SUN, A.; ROBERTS, D.A. Mapping urban forest leaf area index with airborne lidar using penetration metrics and allometry Original Research Article. **Remote Sensing of Environment**, v. 162, p. 141-153, 2015.

ANDRADE, C.A.B.; SCAPIM, C.A.; BRACCINI, A.L.; MARTORELLI, D.T. Produtividade, crescimento e partição de matéria seca em duas cultivares de feijão. **Acta Scientiarum**, v. 31, n. 4, p. 683-688, 2009b.

ANDRADE, N.L.R.; AGUIAR, R.G.; SANCHES, L.; ALVES, E.C.R.F.; NOGUEIRA, J.S.N. Partição do saldo de radiação em áreas de floresta amazônica e floresta de transição amazônia-cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, p.346-355, 2009a.

ANDRÉ, R.G.B.; MENDONÇA, J.C.; MARQUES, V.S.; PINHEIRO, F.M.A. MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p. 375-382, 2010.

BISPO, S.V.; FERREIRA, M.A.; VÉRAS, A.S.C.; BATISTA, A.M.V.; PESSOA, R.A.S.; BLEUEL, M.P. Palma forrageira em substituição ao feno de capim-elefante. Efeito sobre consumo, digestibilidade e características de fermentação ruminal em ovinos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.36, p.1902-1909, 2007.

BLACK, C.C.; OSMOND, C.B. Crassulacean acid metabolism photosynthesis: 'working the night shift'. **Photosynthesis Research**, v.76, p.329-341, 2003.

CARVALHO, L.B; BIANCO, M.S.; BIANCO, S. Estimativa da área foliar de *Synedrellopsis grisebachii* usando método não destrutivo. **Planta daninha**, v.29, p. 1023-1027, 2011.

CAVALCANTE, A.C.R.; CAVALLINI, M.C.; LIMA, N.R.C.B. **Estresse por déficit hídrico em plantas forrageiras**. Sobral, CE: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Embrapa Caprinos e Ovinos, 2009. (Documentos, 89).

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.1, p.23-28, 2000.

- CONSOLI, S.; INGLESE, G.; INGLESE, P. Determination of evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) orchard in a Semi-arid environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, p.680-690, 2013.
- COSTA, M.H.; BIAJOLI, M.C.; SANCHES, L.; MALHADO, A.C.M.; HUTYRA, L.R.; ROCHA, H.R.; AGUIAR, R.G.; DE ARAÚJO, A.C. Atmospheric versus vegetation controls of Amazonian tropical rain forest evapotranspiration: are the wet and seasonally dry rain forests any different? **Journal of Geophysical**, v.115, p.1-9, 2010.
- CUI, M.; MILLER, P.M.; NOBEL, P.S. CO₂ exchange and growth of the crassulacean acid metabolism plant *Opuntia ficus-indica* under elevated CO₂ in open-top chambers. **Plant Physiology**, v.103, n.2, p.519-524, 1993.
- CUI, M.; NOBEL, P.S. Gas exchange and growth responses to elevated CO₂ and light levels in the CAM species *Opuntia ficus-indica*. **Plant, Cell & Environment**, v.17, n.8, p. 935-944, 1994.
- DABBERDT, W.F.; LENSCHOW, D.H.; HORST, T.W.; ZIMMERMAN, P.R.; ONCLEY, S.P.; DELANY, A.C. Atmosphere-surface exchange measurements. **Science**, v.260, n.5113, p.1472-1481, 1993.
- DICKEN, U.; COHEN, S.; TANNY, J. Examination of the Bowen ratio energy balance technique for evapotranspiration estimates in screenhouses. **Biosystems Engineering**, v.114, p.397-405, 2013.
- DOURADO-NETO, D. et al. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, v.57, n.1, p.191-192, 2000.
- DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SANTOS, M.V.F.; LIRA, M.A.; SANTOS, D.C.; FARIAS, I.; LIMA, L.E.; FERREIRA, R.L.C. Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller under different N and P fertilization and plant population in north-east Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.67, n.3, p.357-372, 2006.
- ELLIOTT, W.P. The growth of the atmospheric internal boundary layer. **Transaction of the American Geophysical Union**, v.39, p.1048-1054, 1958.
- FISHER, R.A.; WILLIAMS, M.; RUIVO, M.L.; COSTA, A.L.; MEIR, P. Evaluating climatic and soil water controls on evapotranspiration at two Amazonian rainforest sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.850-861, 2008.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, p. 403-410, 1991.
- GOMIDE, C.A.M.; GOMIDE, J.A.; ALEXANDRINO, E. Índices morfogênicos e de crescimento durante o estabelecimento e a rebrotação do capim-mombaça (*Panicum maximum* Jacq.). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.32, n.4, p.795-803, 2003.

- GONDIM, P.S.S.; LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; HAMMECKER, C.; SILVA, R.A.B.; GOMES, C.A. Environmental control on water vapour and energy exchanges over grasslands in semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.3-8, 2015.
- GUERRA, F.; SLACK, D.C. Resistência aerodinâmica: efeito dos métodos usados para especificar os parâmetros de rugosidade da superfície vegetada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, n.10, p.673-681, 1996.
- HEILMAN, J.L.; BRITTIN, C.L.; NEALE, C.M.U. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 44, p. 261-273, 1989.
- HERNÁNDEZ, A.F.; CASTILLO, I.O.; AMADOR, B.M.; HERNANDEZ, J.L.G. Enrique Troyo-Dieguez yield and physiological traits of prickly pear cactus nopal (*Opuntia* spp.) cultivars under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v.70, p. 97-107, 2004.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York, NY: Academic Press, 1998. 771p.
- ISRAEL, A.A.; NOBEL, P.S. Growth temperature versus CO₂ uptake, Rubisco and PEPCase activities, and enzyme high temperature sensitivities for a CAM plant. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.33, p.345-351, 1995.
- JUNXIA, D.; YIPING, Z.; GUIRUI, Y.; SHUANGJU, Z.; QINGHAI, S. Interannual and seasonal variations of energy and water vapor fluxes above a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, SW China. **Acta Ecologica Sinica**, v.27, p. 3099-3109, 2007.
- KOOL, D.; KUSTAS, W.P.; BEN-GAL, A.; LAZAROVITCH, N.; HEITMAN, J.L.; SAUER, T.J.; AGAM, N. Energy and evapotranspiration partitioning in a desert vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 218-219, p. 277-287, 2016.
- KUMAGAI, T.; SAITOH, T.M.; SATO, Y.; MOROOKA, T.; MANFROI, O.J.; KURAJI, K.; SUZUKI, M. Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effects. **Journal of Hydrology**, v. 287, p. 237-251, 2004.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos, SP: Rima, 2000. 531 p.
- LEWIS, D.A.; NOBEL, P.S. Thermal energy exchange model and water loss of a barrel cactus, *Ferocactus acanthodes*. **Plant Physiol.**, v.60, p.609-616, 1997.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, SP: EDUSP, 2005. 335p.
- LIGUORI, G.; INGLESE, G.; PERNICE, F.; SORTINO, G.; INGLESE, P. CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. **Italian Journal of Agronomy**, v.8, n.3, p.14-20, 2013.
- LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; LIRA, C.A.B.O.; SOUZA, E.S.; SILVA, I.F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, p. 65-74, 2011.

LOPES, S.J.; BRUM, B.; SANTOS, V.J.; FAGAN, E.B.; LUZ, G.L.; MEDEIROS, S.L.P. Estimativa da área foliar de meloeiro em estádios fenológicos por fotos digitais. **Ciência Rural**, v.37, n.4, p. 1153-1156, 2007.

LYRA, G.B. **Parâmetros de rugosidade aerodinâmica sobre vegetação esparsa**. 2005. 75 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2005.

LYRA, G.B.; PEREIRA, A.R. Dificuldades de estimativa dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica pelo perfil logarítmico do vento sobre vegetação esparsa em região semi-árida. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.25, n.2, p.187-197, 2007b.

LYRA, G.B.; PEREIRA, A.R. Parâmetros de rugosidade aerodinâmica sobre vegetação esparsa em região semi-árida. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.2, p. 262-272, 2007a.

MA, Y.; FENG, S.; SONG, X. A root zone model for estimating soil water balance and crop yield responses to deficit irrigation in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v.127, p.13-24, 2013.

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.

MATSUMOTO, K.; OHTA, T.; NAKAI, T.; KUWADA, T.; DAIKOKU, K.; IIDA, S.; YABUKI, H.; KONONOV, A.V.; VAN DER MOLEN, M.K.; KODAMA, Y.; MAXIMOV, T.C.; DOLMAN, A.J.; HATTORI, S. Responses of surface conductance to forest environments in the Far East. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 1926-1940, 2008.

McCAUGHEY, J.H. Termos de armazenamento balanço energético em uma floresta mista madura em Petawawa, Ontario: um estudo de caso. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 31, p. 89-101, 1985.

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

MEYERS, T.P.; HOLLINGER, S.E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 105-115, 2004.

MIYAKE, M. **Transformation of the atmospheric boundary layer over inhomogeneous surfaces**. Seattle: University of Washington, 1965. (Scientific Report, 5R-6).

MONTEIRO, J.E.B.A.; SENTELHAS, P.C.; CHIAVEGATO, E.J.; GUISELINI, C.; SANTIAGO, A.V.; PRELA, A. Estimativa da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas. **Bragantia**, v.64, n.1, p.15-24, 2005.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere**. 4.ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. p. 401.

- MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**. 2.ed. New York, NY: Edward Arnold, 1990. 291 p.
- MOORE, C.J.; FISCH, G. Estimating heat storage in amazonian tropical forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 38, p.147-169, 1986.
- MOROKE, T.S.; SCHWARTZ, R.C.; BROWN, K.W.; JUO, A.S.R. Water use efficiency of dryland cowpea, sorghum and sunflower under reduced tillage. **Soil & Tillage Research**, v.112, p.76-84, 2011.
- MOUNZER, O.H.; HERNÁNDEZ, R.M.; VILLENA, I.A.; MUÑOZ, J.V.; RUIZ-SÁNCHEZ, M.C.; VARGAS, L.M.T.; ARNALDOS, V.P.; GARCÍA, J.M.A. Estimating evapotranspiration by capacitance and neutron probes in a drip-irrigated apricot orchard. **INCI[online]**, v.33, p. 586-590, 2008.
- NOBEL, P.S. Biologia ambiental. In: BARBERA, G.; INGLESE, P. **Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira**. João Pessoa, PB: SEBRAE-PB, 2001. 300 p.
- NOBEL, P.S.; HARTSOCK, T.L. Physiological responses of *Opuntia ficus-indica* to growth temperature. **Physiologia Plantarum**, v.60, p. 98-105, 1984.
- NOBEL, P.S.; BOBICH, E. Initial net CO₂ uptake responses and root growth for a CAM community placed in a closed environment. **Annals Botany**, v.90, p. 593-598, 2002.
- ORTEGA-FARIAS, S.O.; CUENCA, R.H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, p. 131-143, 1996.
- ORTEGA-FARIAS, S.O.; OLIOSO, A.; FUENTES, S.; VALDES, H. Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman–Monteith equation with a variable surface canopy resistance. **Agricultural Water Management**, v.82, p.421-432, 2006.
- PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; NOVA, N.A.V. **Evapotranspiração**. Campinas, SP: Fundag, 2013. 323p.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.
- PETERSON, E.W. Modification of mean flow and turbulent energy by a change in surface roughness under conditions of neutral stability. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 95, n.406, p.561-575, 1969.
- PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Seropédica, RJ: Edur, 1998. 150p.
- PIMIENTA-BARRIOS, E.; ZAÑUDO-HERNÁNDEZ, J.; NOBEL, P.S. Effects of young cladodes on the gas exchange of basal cladodes of *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae) under wet and dry conditions. **International Journal of Plant Sciences**, v.166, n.96, p.1-8, 2005.

- PINHEIRO, K.M.; SILVA, T.G.F.; CARVALHO, H.F.S.; SANTOS, J.E.O.; MORAIS, J.E.F.; ZOLNIER, S.; SANTOS, D.C. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49,p. 939-947, 2014.
- QIN, Z.; OUYANG, Y.; SU, G.; YU, Q.; LI, J.; ZHANG, J.; WU, Z. Characterization of CO₂ and water vapor fluxes in a summer maize field with wavelet analysis. **Ecological Informatics**, Amsterdam, v. 3, p.397-409, 2008.
- RAES, D.; GEERTS, S.; KIPKORIR, E.; WELLENS, J.; SAHLI, A. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. **Agricultural Water Management**, v.81, p.335-357, 2006.
- REICHARDT, K. **A água nos sistemas agrícolas**. São Paulo, SP: Manole, 1987. 188p.
- ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B. **Microclimate**: the biological environment. New York, NY: John Wiley, 1983. 495 p.
- SAN JOSÉ, J.J.; MONTES, R.; NIKONOVA, N. Diurnal patterns of carbon dioxide, water vapour and energy fluxes in pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr. Cv. Red Spanish] field using eddy covariance. **Photosynthetica**, v. 45, p.370-384, 2007.
- SANCHES, L.; SILVA, L.B.; LIMA, S.D.; PEREIRA, O.A.; CARRILHO, F.J.; NOGUEIRA, J.S. Estoque de energia na biomassa e no ar do dossel de *Vochysia divergens* Pohl. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**,v.18, p.955-962, 2014.
- SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, p.287-294, 1998.
- SCHMID, H.P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p.159-183, 2002.
- SHAW, R.H.; PEREIRA, A.R. Aerodynamic roughness of a plant canopy: a numerical experiment. **Agricultural Meteorology**, v.26, p.51-65, 1982.
- SHUTTLEWORTH, W.J. Evaporation from Amazonian rainforest. **Proc. R. Soc. London**, v. b233, p.321-346, 1988.
- SILVA, M.M. **Balço de água no solo com milho sob sistema plantio direto e diferentes dose de nitrogênio**.2007. 87f. Tese de Doutorado (Física do Ambiente Agrícola) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2007.
- SILVA, N.G.M.; LIRA, M.A.; SANTOS, M.V.F.; DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; MELLO, A.C.L.; SILVA, M.C. Relação entre características morfológicas e produtivas de clones de palma-forrageira. **Revista Brasileira de Zootecnia**,v.39, n.11, p.2389-2397, 2010.

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; SOUZA, L.S.B.; 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**, v.15, p.139-147, 2011.

SILVA, T.G.F.; ZOLNIER, S.; MOURA, M.S.B.; CARMO, J.F.A.; RIBEIRO, A. Fator de desacoplamento em um canavial irrigado no submédio do Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.16, n.8, p. 849-858, 2012.

SILVA, T.G.F.; ARAÚJO PRIMO, J.T.; SILVA, S.M.S.; MOURA, M.S.B.; SANTOS, D.C.; SILVA, M.C.; ARAÚJO, J.E.M. Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. **Bragantia**, v. 73, n. 2, p.184-191, 2014a.

SILVA, T.G.F.; MIRANDA, K.R.; SANTOS, D.C.; QUEIROZ, M.G.; SILVA, M.C.; CRUZ NETO, J.F.; ARAÚJO, J.E.M. Área do cladódio de clones de palma forrageira: modelagem, análise e aplicabilidade. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, p. 633-641, 2014b.

SOUZA FILHO, J.D.C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; COHEN, J.C.P. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, p. 223-229, 2005.

SOUZA, C.B.; SILVA, B.B.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, V.P.R. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.400-407, 2008.

SOUZA, P.J.O.; ROCHA, E.J.P.; RIBEIRO, A.; SOUZA, E.B. Balanço de radiação em ecossistema de soja na Amazônia. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, p. 582-592, 2010.

STEIDLE NETO, A.J.; ZOLNIER, S.; MAROUELLI, W.A.; CARRIJO, O.A. Razão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global no cultivo do tomateiro em casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.6, p.626-631, 2008.

SUN, G.; NOORMETS, A.; GAVAZZI, M.J.; McNULTY, S.G.; CHEN, J.; DOMEK, J.C.; KING, J.S.; AMATYA, D.M.; SKAGGS, R.W. Energy and water balance of two contrasting loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina, USA. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p.1299-1310, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre, RS: Artmed, 2013. 918p.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSEN, W.G.M.; MOURA, M.S.B.; SOARES, J.M.; AHMAD, M.D.; BOS, M.G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.1524-1537, 2008.

TOLEDO FILHO, M.R. **Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas**. 2001. 150 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**.Viçosa, MG: UFV, 1991. 449p.

VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A.B.; SHOCK, C.C. Estimation of reference evapotranspiration by an energy balance approach. **Biosystems Engineering**, v.96, p.605-615, 2007.

WARD, P.R.; FLOWER, K.C.; CORDINGLEY, N.; WEEKS, C.; MICIN, S.F. Soil water balance with cover crops and conservation agriculture in a Mediterranean climate. **Field Crops Research**, v.132, p.33-39, 2012.

WIERINGA, J. Representative roughness parameters for homogeneous terrain. **Boundary Layer Meteorology**, v.63, p.323-363, 1993.

WINTER, K.; GARCIA, M.; HOLTUM, J.A.M. On the nature of facultative and constitutive CAM: environmental and developmental control of CAM expression during early growth of *Clusia*, *Kalanchoe*, and *Opuntia*. **Journal of Experimental Botany**, v. 59, n. 7, p. 1829-1840, 2008.

ARTIGO 1 - Balanço de radiação e de energia da palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] na região do Semiárido brasileiro

Resumo. Objetivou-se analisar os padrões dos componentes dos balanços de radiação e energia e suas partições em um cultivo de palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], na região do Semiárido brasileiro. O experimento foi conduzido no município de Floresta, Pernambuco, onde se instalou uma torre, no centro da área, para coleta de dados micrometeorológicos entre 10 de dezembro de 2015 e 10 de dezembro de 2016. Os dados foram analisados considerando quatro períodos de regime hídrico: I - “seco-chuvoso”, II - “chuvoso”, III - “chuvoso- seco”; e, IV “seco”, subdividido conforme a sazonalidade das chuvas durante o experimento. Os dados micrometeorológicos foram comparados entre os períodos de regime hídrico, por meio dos testes de Kruskal-Wallis e de Dunn ($p < 5\%$). A magnitude e variação da maioria dos componentes dos balanços de radiação e de energia estiveram atreladas à disponibilidade hídrica e ao índice de área do cladódio (IAC). No período mais chuvoso, houve maior retenção de energia no sistema solo-planta-atmosfera, com alto saldo de radiação ($\sim 13,38 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e baixa taxa da radiação refletida ($2,77 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), resultando no menor valor de albedo (14%). O IAC influenciou significativamente na dinâmica da radiação fotossinteticamente ativa que chega abaixo da cultura (RFAb), proporcionando a menor média deste componente ($2,29 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) quando houve o mais elevado nível de IAC, aumentando nesta época a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (73%). A baixa disponibilidade hídrica da região e os distintos valores de IAC das diferentes épocas de disponibilidade hídrica fizeram com que a maior parte da energia disponível do balanço de energia fosse transformada em calor sensível (50%), vindo em sequência o calor latente (38%), o calor no solo (10%) e o estoque de energia na biomassa e armazenamento no dossel da cultura (1%).

Termos para indexação: Metabolismo Ácido das Crassuláceas, disponibilidade hídrica, razão de Bowen, micrometeorologia.

Radiation and energy balance in cactus pear [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] in the Brazilian semi-arid region

Abstract. The objective of this study was to analyze the patterns of the radiation and energy balance components and their partitions in a cactus pear crop [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] in the Brazilian semi-arid region. The experiment was conducted in the municipality of Floresta, Pernambuco, where a tower was installed in the center of the area to collect micrometeorological data between December 10, 2015 and December 10, 2016. Data were analyzed considering four periods of water regime: I - "dry rainy", II - "rainy", III - "dry rainy"; and, IV "dry", subdivided according to the seasonality of the rains during the experiment. Micrometeorological data were compared between the water regime periods, using the Kruskal-Wallis and Dunn tests ($p < 5\%$). The magnitude and variation of most components of the radiation and energy balances were correlated with water availability and the cladode area index (IAC). In the rainy season, there was higher retention of energy in the soil-plant-atmosphere system, with a high radiation balance ($\sim 13.38 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) and a low rate of reflected radiation ($2.77 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), resulting in the lowest value of albedo (14%). The IAC significantly influenced the dynamics of the photosynthetically active radiation that arrives below the culture (RFAb), providing the lowest mean of this component ($2.29 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) when there

was the highest level of CAI, increasing at this time fraction of the photosynthetically active radiation intercepted (73%). The low water availability of the region, plus the different IAC values of the different times of water availability, provided that most of the energy available in the energy balance was transformed into sensible heat (50%), followed by latent heat (38%), soil heat (10%) and energy storage in biomass and storage in the canopy of the crop (1%).

Index terms: *Opuntia stricta*, water availability, Bowen ratio, micrometeorology.

Introdução

A palma forrageira é uma espécie muito empregada na alimentação animal em várias partes do mundo (Lefsih et al., 2016; Adli et al., 2017), e é considerada a planta forrageira mais utilizada no Nordeste brasileiro (Silva et al., 2010) devido as suas características morfofisiológicas que possibilitam a sua sobrevivência em ambientes de baixa disponibilidade hídrica, alta temperatura e solos com pouca fertilidade, característicos de localidades áridas e semiáridas (Tegegne et al., 2007; Consoli et al., 2013, Kyriacou et al., 2016; Podda et al., 2017).

A boa adaptabilidade deve-se ao seu mecanismo morfofisiológico MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas). Espécies desse grupo são caracterizadas pelo fechamento dos seus estômatos durante o dia para evitar a perda de água nesse período, abrindo-os durante a noite, quando há um baixo déficit de pressão de vapor d'água. Assim, ocorre diminuição das perdas por transpiração, o que potencializa a eficiência do uso de água pelas Crassuláceas (Nobel, 2001; Scalisi et al., 2016).

Apesar dessa alta adaptabilidade que a palma possui em ambientes considerados como não propícios ao cultivo de outras plantas, o seu crescimento, como de qualquer outra cultura, responde de forma diferente às condições meteorológicas locais, especialmente disponibilidade hídrica (Scalisi et al., 2016). Esse fator influencia na dinâmica de assimilação de CO₂ e, conseqüentemente, na sua eficiência fotossintética (Winter et al., 2008), o que provavelmente poderá refletir nos padrões e particionamento dos fluxos existentes no sistema solo-planta-atmosfera.

Para a compreensão desses padrões nos diferentes agroecossistemas e avaliação das alterações de suas interações com a atmosfera, é indispensável quantificar as relações existente dos fluxos de radiação, energia, CO₂ e água nas superfícies vegetadas. Parte dessa interação pode ser obtida pela mensuração dos balanços de radiação (Wang et al., 2014; Li et al., 2015) e de energia (Silva et al., 2011; Kool et al., 2016; Hirano et al., 2017).

Conhecimentos dessa natureza permitem a estimativa da evapotranspiração e a identificação da afinidade do crescimento das espécies em função da partição da energia disponível, auxiliando na compreensão de suas respostas aos diversos ambientes em que foram expostas (Consoli et al., 2013; Holland et al., 2013; Hirano et al., 2017). Tratando-se especificamente de plantas de importância agrícola, isso poderá ir mais além, a partir da disponibilização de subsídios para um melhor manejo cultural.

Espécies como a palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) ainda possuem poucas informações sobre essas relações com a atmosfera (Nobel & Bobich, 2002; San José et al., 2007; Consoli et al., 2013), as quais auxiliam na compreensão do seu comportamento. Porém, ainda são conhecimentos limitados para uma caracterização generalizada dessas interações, o que reforça a necessidade de mais estudos dessa natureza e em diferentes localidades.

Diante disso, e para entender mais como essas espécies respondem aos ambientes em que foram submetidas, o presente trabalho teve como objetivo analisar os padrões dos componentes do balanço de radiação e energia, assim como suas partições, sobre um sistema de cultivo de palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], em diferentes períodos de disponibilidade hídrica na região do Semiárido brasileiro.

Material e Métodos

Área experimental e cultura

O experimento foi conduzido na Fazenda Algodões (Latitude: 8,30°S; Longitude: 38,51°O e Altitude: 380,83 m), município de Floresta, estado de Pernambuco, região semiárida do Nordeste brasileiro. Na área experimental, foi plantada a palma forrageira, cultivar Orelha de Elefante Mexicana [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] em 02 de agosto de 2014, no espaçamento de 2 m entre fileiras e 0,5 m entre plantas. Esse procedimento proporcionou uma relação bordadura:altura dos sensores de 40:1, na direção predominante do vento.

Os dados experimentais foram coletados a partir de 10 de dezembro de 2015, no segundo ano de cultivo da espécie, estendendo-se até 10 de dezembro de 2016. Durante esse período, a área foi conduzida em sistema de sequeiro e sempre que necessário recebeu capinas e aplicação de defensivos para o controle da cochonilha de escama (*Diaspis echinocacti* Bouché).

Aquisição de dados micrometeorológicos

Dados micrometeorológicos foram coletados a partir de uma torre com quatro metros de altura, localizada no centro do campo experimental. Os sensores eletrônicos foram: dois psicrômetros aspirados, cada um foi composto por dois termopares Cobre-Constantan do tipo T, estando o primeiro psicrômetros instalado à altura de $2 z_{om}$ do topo do dossel da cultura (em que z_{om} é parâmetro de rugosidade da superfície para o momentum, m), enquanto o segundo, à distância de 0,75 m acima do primeiro, para aquisição das temperaturas do bulbo seco, t_{bs1} e t_{bs2} (°C) e temperaturas do bulbo úmido, t_{bu1} e t_{bu2} (°C), nos dois níveis de altura, respectivamente; dois piranômetros para medição da radiação solar global incidente (R_g , MJ m⁻² d⁻¹; CS 300 Pyranometer, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e refletida (R_r , MJ m⁻² d⁻¹; CMP3 Pyranometer, Kipp & Zonen, Bohemia, USA), este último posicionado de forma invertida; um sensor quântico, para medição da radiação fotossinteticamente ativa (RFA, MJ m⁻² d⁻¹; LI-190 SB Quantum Sensor, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA); três sensores PAR linear, para medição da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, MJ m⁻² d⁻¹; SQ-321 Calibration Line Quantum Net10 sensors, Apogee, Logan, Utah, USA), sendo um posicionado a cima da cultura, para medição da RFA incidente (RFAa, MJ m⁻² d⁻¹), e os outros dois no solo próximo das plantas, de forma transversal em relação à fileira de cultivo, para medição da RFA que chega abaixo da cultura (RFAb, MJ m⁻² d⁻¹); um saldo radiômetro, para a aquisição do balanço de radiação (MJ m⁻² d⁻¹; NR-LITE 2 Net radiometer, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA); um pluviômetro, para aquisição dos dados de precipitação pluviométrica (mm; TE525MM-L34, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA); um anemômetro (03002 R.M. Young Wind Sentry Set, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA), para obtenção dos dados de velocidade (m s⁻¹) e direção dos ventos (graus); e 12 termopares Cobre-Constantan do tipo T, a fim de adquirir as temperaturas dos cladódios.

Além dos sensores acoplados à estrutura da torre, foram instalados sensores na superfície do solo: dois fluxímetros a 0,05 m de profundidade, para medição do fluxo de calor do solo (MJ m⁻² d⁻¹; HFP01SC Self-Calibrating Heat Flux Sensor, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e dois sensores para medir a temperatura do solo (°C; TCAV-L50, Averaging soil thermocouple probe, Campbell Scientific), nas profundidades de 0,15 e 0,30 m.

Todos sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados (CR1000-ST-SW-NC, Campbell Scientific) e a um multiplexador (AM16/32B-ST-SW),

que realizava medições a cada 60 segundos, com armazenamento médio em intervalos de 10 minutos.

Balanco de radiação

O balanço de radiação foi composto pelo: saldo de radiação (R_n ; $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); radiação solar global incidente (R_g ; $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); radiação solar global refletida (R_r ; $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), radiação fotossinteticamente ativa incidente acima (RFAa, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e abaixo da cultura (RFAb, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), balanço de ondas curtas ($\text{BOC} = R_g \cdot (1 - \alpha)$; $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); balanço de ondas longas ($\text{BOL} = R_n - \text{BOC}$; $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e albedo ($\alpha = R_r / R_g$; %).

Balanco de energia pelo método da razão de Bowen

Os componentes do balanço de energia foram calculados pelo particionamento do saldo de radiação (R_n , $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), incluindo fluxo de calor sensível (H ; $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), fluxo de calor latente (LE ; $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), fluxo de calor no solo (G ; $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), estoque de energia na biomassa e armazenamento no dossel da cultura ($Misc$; $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e o armazenamento de calor no solo (S ; $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), expressos matematicamente como:

$$R_n = LE + H + G + (Misc + S)$$

(1)

O LE foi obtido pelo método do balanço de energia na razão de Bowen (BERB) (Perez et al., 1999; Teixeira et al., 2008; Dicken et al., 2013; Gondim et al., 2015), em que:

$$LE = \frac{R_n - G}{1 - \beta}$$

(2)

sendo β a razão de Bowen (adimensional).

A razão de Bowen (β) foi estimada pela equação psicrométrica (Righi et al., 2007):

$$\beta = \left(\frac{\Delta + \gamma \left(\frac{t_{bu1} - t_{bu2}}{t_{bs1} - t_{bs2}} \right)}{\gamma} \right)^{-1}$$

(3)

em que Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); t_{bu1} e t_{bu2} são as temperaturas de bulbo úmido e

t_{bs1} e t_{bs2} são as temperaturas de bulbo seco, sendo ambas em dois níveis de medida acima do dossel da cultura ($^{\circ}\text{C}$).

O estoque de energia na biomassa e o armazenamento no dossel da cultura (Misc; $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) foram calculados por uma adaptação dos procedimentos propostos por Lewis & Nobel (1977), não considerando para essa determinação que a cultura assumiria um volume cilíndrico, mas sim uma soma do desmembramento do acúmulo da energia armazenada por cada cladódio pertencente à planta, mais a energia contida no ar dentro e nos arredores da estrutura da planta, ao longo do tempo de análise:

$$\text{Misc} = C_{vh}V \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

(4)

em que C_{vh} é a capacidade calorífica volumétrica da quantidade de água contida nos cladódios, mais a capacidade calorífica volumétrica do ar dentro do dossel ($\text{J m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$); V é o volume específico da planta sobre uma área de superfície (m); ΔT é a variação da temperatura entre a planta e o ar ($^{\circ}\text{C}$); e Δt é o intervalo de tempo.

Por fim, os valores do fluxo de calor sensível (H) foram obtidos a partir do resíduo da Equação 1.

Avaliação de dados para utilização do método do balanço de energia na razão de Bowen

A avaliação dos erros com base na estimativa dos valores de β foi feita por meio da aplicação dos critérios desenvolvidos por Perez et al. (1999), que caracterizam a consistência física dos dados micrometeorológicos, fundamentada nos valores do perfil da pressão de vapor d'água, a partir dos limites de resolução dos sensores e sinais dos gradientes de pressão de vapor d'água e de temperatura.

Neste estudo, foram considerados como valores positivos do R_n e G quando os mesmos estiveram em direção à superfície, enquanto os componentes LE e H só foram positivos quando estiveram na direção oposta à superfície e aos gradientes de temperatura (Dt) e pressão de vapor (De). Os gradientes foram obtidos a partir das medidas de temperatura (t) e da pressão (e) do perfil atmosférico, adquiridas das medidas em duas alturas acima do dossel da cultura (z_1 e z_2), ($\Delta t = t_{bs1} - t_{bs2}$ e $\Delta e = e_1 - e_2$).

Por fim, as estimativas dos valores diários de LE e H utilizaram dados de R_n , G e β a cada 10 minutos, quando os valores de R_n-G eram positivos. Apesar disso,

foram aproveitados somente os dias que ofereceram pelo menos 65% dos dados de LE e H fisicamente consistente, conforme os critérios antes citados, qualificando o dia como “válido”.

Crescimento da palma forrageira

O crescimento da cultura foi analisado no intervalo de 30 dias a partir de campanhas biométricas (Pereira et al., 2015; Queiroz et al., 2015; Silva et al., 2015). As campanhas consistiram do monitoradas 12 plantas próximas à torre, com coleta dos dados de largura (LC) e comprimento dos cladódios (CC), além da contagem do número total de cladódios por planta (NCP), para determinação da área do cladódio (AC, m²) e o índice de área do cladódio (IAC, m² m⁻²), conforme a metodologia aplicada por Silva et al. (2014) na cultivar Orelha de Elefante Mexicana (OEM):

$$AC = \frac{0,7086 \left(1 - \exp \left(-0,000045765 * CC * LC \right) \right)}{0,000045765}$$

(5)

$$IAC = \left(\frac{\sum_{i=1}^n AC}{n} \right) / 10000 / (E1 \times E2) \quad (6)$$

em que E1 (0,5 m) e E2 (2 m) são os espaçamentos entre as plantas e as fileiras, respectivamente.

Divisão do período experimental conforme a disponibilidade hídrica da região

Para avaliação dos dados experimentais, a época de análise desse estudo foi dividida conforme a ocorrência da precipitação pluviométrica local. Denominando-se de período “seco”, “chuvoso” e “transições”.

Um dia foi inserido no período “seco” quando, no intervalo de 30 dias antecedentes e subsequentes a ele, a precipitação foi menor que 20 mm e o número de dias com pelo menos 1 mm foi inferior a 5 dias. Em contraste, foi inserido no período “chuvoso” quando, nesse mesmo intervalo de tempo, a precipitação foi maior que 20 mm e o número de dias com pelo menos 1 mm foi superior a 5 dias. Os dias que não atendiam a esses critérios foram enquadrados nos períodos de transições “seco-chuvoso” ou “chuvoso-seco”.

Portanto, quatro períodos foram estabelecidos: “seco-chuvoso” (I; 10/12/2015 a 06/01/2016 com 51,3 mm), “chuvoso” (II; 07/01/2016 a 01/03/2016 com 142 mm),

“chuvoso-seco” (III; 02/03/2016 a 26/07/2016 com 123,1 mm) e “seco” (IV; 27/07/2016 a 10/12/2016 com 2,4 mm).

Análise estatística

Os dados do balanço de radiação e energia foram submetidos a testes de normalidade e, devido a não normalidade de seus resíduos, aplicaram-se os testes não paramétricos de Kruskal-Wallis e o de média de Dunn, ao nível de 5% significância, utilizando o Software XL-STAR.

Resultados e Discussão

Observa-se na Figura 1 o comportamento das variáveis meteorológicas na área de estudo, durante o período de 10 de dezembro de 2015 a 10 de dezembro de 2016, em que a precipitação pluviométrica acumulada foi de 319,4 mm, equivalente a $\cong 52\%$ da sua normal climatológica (610 mm ano^{-1}) no município de Floresta – PE (INMET, 1961-1990). Verificou-se que as maiores taxas de precipitação ficaram entre os meses de dezembro de 2015 a abril de 2016, período chuvosos da região, e as menores a partir do mês de agosto de 2016 até o término do experimento (Figura 1A).

Já a média anual da umidade relativa do ar foi de 61,2%, próximo da sua normal climatológica (61,5%), apresentando os seus maiores valores entre os meses de dezembro de 2015 a julho de 2016, devido ao fato desses meses terem exibido os maiores volumes de precipitação, elevando, assim, esse componente (Figura 1B).

A temperatura média anual, por sua vez, foi de 27,6°C (Figura 1B), um grau mais elevado do que a média histórica (26,6°C), com elevados valores no início e término do período experimental, por causa da maior incidência de radiação solar nessas épocas, que apresentou ao longo do experimento média de $20,33 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ (Figura 1D).

Por fim, a velocidade do vento exibiu média de $1,60 \text{ m s}^{-1}$, menor do que a da normal climatológica ($2,16 \text{ m s}^{-1}$), com uma maior expressividade após o mês de julho até o final do período de análise (Figura 1C).

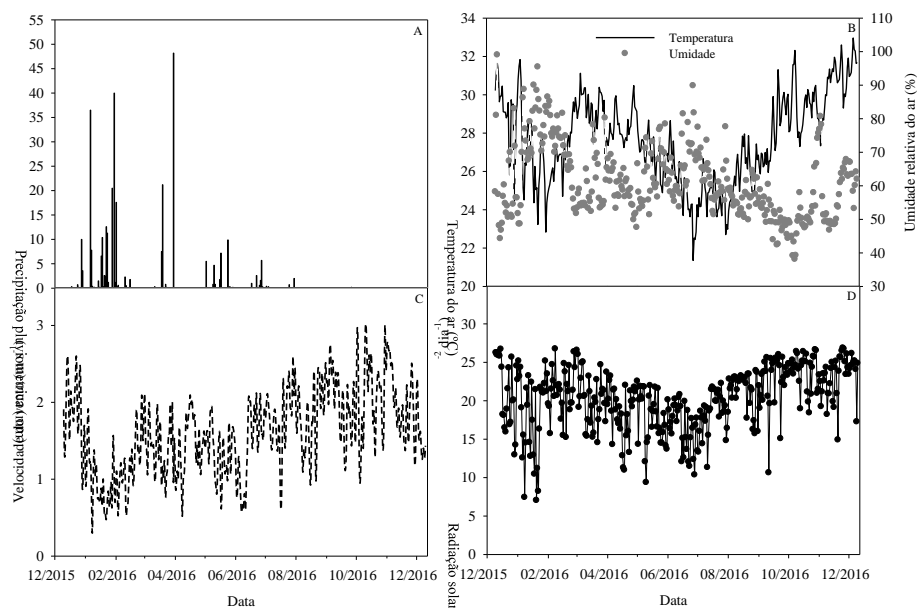


Figura 1 – Comportamento das variáveis meteorológicas durante o período experimental (10 de dezembro de 2015 a 10 de dezembro de 2016) em uma área cultivada com a palma forrageira [*Opuntia strictia* (Haw.)Haw], no município de Floresta, Pernambuco, Semiárido brasileiro.

Com as informações dessas variáveis, e as dos demais elementos medidos na torre micrometeorológica a cada 60 segundos, além do armazenamento médio em intervalos de 10 minutos, foi constituído um banco de dados com aproximadamente 52.848 valores coletados para cada componente, durante todo o período de experimental. A partir dessas informações, adotaram-se os critérios sugeridos por Perez et al. (1999), constatando-se que 44,4% dos dados foram considerados como fisicamente consistentes, o que resultou em cerca de 162 dias válidos para todo o período de estudo.

Utilizando-se desses dados micrometeorológicos e da identificação dos dias considerados como “válidos”, pôde-se avaliar os componentes dos balanços de radiação e energia e suas partições, além do comportamento do IAC (índice de área do cladódio) nos diferentes períodos de disponibilidade hídrica. O índice de área do cladódio médio (IAC, média de todos os cladódios) ao longo do período de estudo pode ser observado na Figura 2.

Constatou-se que, para a cultura da palma forrageira, houve um significativo aumento desse índice nos períodos I e II com a elevação da disponibilidade hídrica. Essa conduta também se estendeu para o período III, mesmo sendo uma época de baixa disponibilidade hídrica, demonstrando que a palma continuou a se desenvolver mesmo em condições de estresse, fato que pode estar associado à quantidade de água retida em sua

estrutura nos períodos anteriores. Entretanto, depois do período III, ocorreu queda nos valores deste coeficiente (período IV), acompanhando assim a diminuição da chuva, o que atenuou o surgimento de novos cladódios e, especialmente, influenciou na largura e comprimento dos cladódios antigos, pois eles se tornaram mais “murchos” por causa desse estresse.

O elevado aumento do IAC durante os períodos I e II pode ser explicado pela rapidez e alta capacidade que essa cultura tem em armazenar água em sua estrutura. Após os primeiros eventos de precipitação, depois de uma época de seca, ocorre um aumento no sistema radicular com o surgimento de raízes próximas à superfície, que são denominadas de “raízes de chuva”. Essas raízes são estabelecidas poucas horas depois do molhamento do solo (Snyman, 2006), tornando a cultura rápida e eficiente na absorção da água disponível.

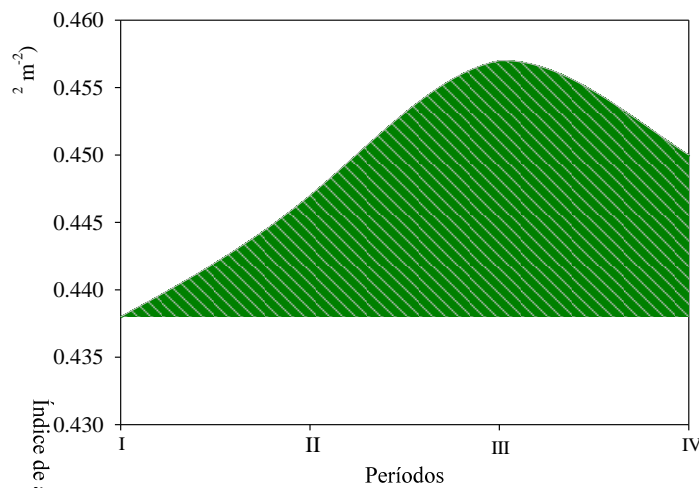


Figura 2 – Desempenho do índice de área do cladódio (IAC $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), na cultura da palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], em diferentes épocas de disponibilidade hídrica (I-seco-chuvoso; II-chuvoso; III-chuvoso-seco; IV-seco), durante o período de 10/12/2015 a 10/12/2016, no município de Floresta, Pernambuco.

A quantidade de água no ambiente de cultivo é sem dúvida um grande influenciador no crescimento dessa espécie. Queiroz et al. (2015) verificaram, para essa mesma variedade de palma forrageira, a ocorrência de um aumento no crescimento com a elevação da disponibilidade de água, sobressaindo as características de largura e comprimento dos cladódios, além de também terem respondido mais rapidamente à

emissão dessas estruturas de primeira e segunda ordens que, conseqüentemente, auxiliaram na elevação do IAC da cultura.

Por sua vez, a redução de água no sistema de cultivo da palma proporciona uma alteração brusca do seu comportamento fisiológico, reduzindo as suas atividades morfológicas, o que afetou no seu desenvolvimento, como foi observado depois do período III (Figura 2).

Pimienta-Barrios et al. (2005) descrevem que, apesar dessa espécie ser resistente a seca, o déficit hídrico influencia na sua relação fonte-dreno. Isso faz com que a absorção de CO₂ líquido diário pelo cladódio basal (cladódio que irá dar origem aos demais) seja expressivamente reduzida com o aumento no número dos demais cladódios. Esse comportamento causa redução no teor relativo de água do cladódio basal, atrelado à alta demanda hídrica dos demais cladódios, o que reduz também a captação de CO₂ por essas estruturas. Winter et al. (2008) também citam que a disponibilidade de água é sem dúvida um regulador da fixação de CO₂, pois, em situações de ausência de estresse hídrico, a cultura apresenta magnitudes de absorção semelhantes durante o dia e a noite, e, ao se inverter essa condição, ocorre um ligeiro declínio na fixação de CO₂ na luz acompanhado por um aumento contínuo dessa fixação no escuro.

Quanto a sua relação com os fluxos do balanço de radiação e de energia, a compreensão da influência da disponibilidade hídrica na cultura da palma forrageira e as suas interações com o ambiente durante as diferentes épocas de disponibilidade hídrica podem ser vistas na Figura 3.

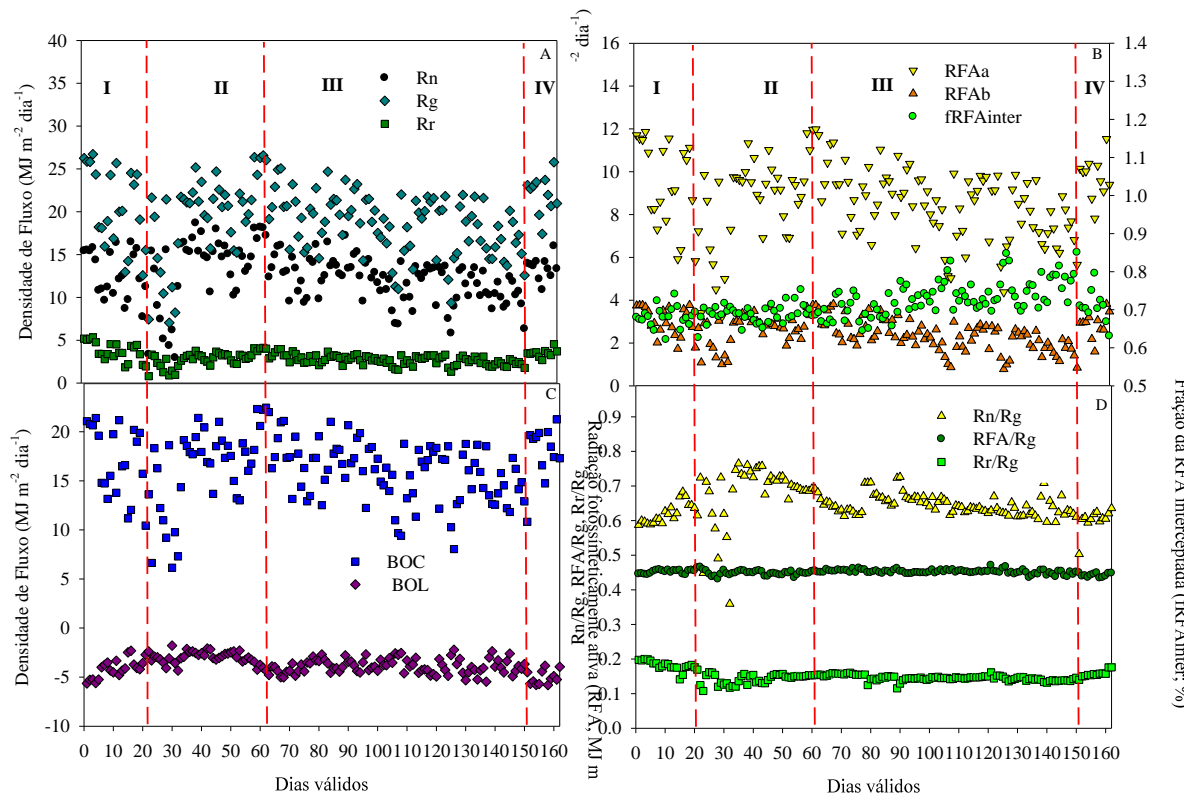


Figura 3 – Comportamento dos fluxos do balanço de radiação e suas partições para os dias considerados como válidos pelo método de Perez et al. (1999), referentes ao período de 10/12/2015 a 10/12/2016, e divididos conforme as diferentes condições de disponibilidade hídrica proporcionada pela precipitação pluviométrica local durante essa época (I - período “seco-chuvoso” de 10/12/2015 a 06/01/2016; II - período “chuvoso” de 07/01 à 01/03/2016; III - período “chuvoso-seco” de 02/03 à 26/07/2016 e IV - período “seco” de 27/07 à 10/12/2016), em uma área de cultivo com a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] no município de Floresta, Pernambuco.

Observa-se que os fluxos do Rg, Rn e Rr apresentaram comportamentos diários semelhantes ao longo do tempo de análise (Figura 3A), com valores elevados nos períodos I, II e início do III, diminuído em sequência até o seu término e aumentando novamente no período IV (Tabela 1). Uma das causas dessa variação diária, ao longo dos diferentes períodos, está atrelada ao movimento de translação com a inclinação do eixo da Terra, formando as diferentes estações do ano.

De modo geral, ao longo dos dias considerados válidos, o comportamento dos valores de Rn acompanhou o desempenho dos valores de Rg (Figura 3A), e todas as vezes que este componente reduzia em relação à quantidade de radiação solar global que chegou, os valores de BOL ficavam menos negativos e diminuía os valores do BOC (Figura 3C), proporcionando menores amplitudes da relação Rn/Rg (Figura 3D).

As menores expressões da relação R_n/R_g foram identificadas nos períodos I, III e IV (Tabela 1), demonstrando menor retenção de energia no sistema nestas épocas, por causa dos elevados valores de BOL. Esse resultado pode estar associado aos baixos valores de precipitação desses períodos, proporcionando pouco vapor d'água no sistema, que não manteve, assim, a energia e facilitou a sua perda para o espaço. Além disso, diferentes valores do IAC (Figura 2) não tinham uma estrutura significativa para reter essa energia no seu dossel.

Já no período II (Tabela 1), além da significativa energia disponível pelo R_n , houve o aumento na quantidade de chuvas, que elevaram a quantidade de vapor d'água na região, retendo mais energia no sistema. Além disso, ocorreu elevação do IAC, que aumentou o dossel da cultura (Figura 2) e reteve também parte dessa energia. Esses fatores proporcionaram menor emissão de radiação de ondas longas do solo para a atmosfera e redução da incidência de radiação solar sobre a superfície (Silva et al., 2011).

Quanto ao comportamento do fluxo da R_r , apesar de ter acompanhado a disponibilidade da R_g ao longo dos períodos, esse componente pouco oscilou, apresentando magnitudes mínima e máxima de 0,8 a 5,32 MJ m⁻² dia⁻¹ nos períodos II e I (Figura 3A), respectivamente, com média de 3,2 MJ m⁻² dia⁻¹ para todo o ciclo (Tabela 1). Tal desempenho gerou uma baixa relação R_r/R_g (albedo) que variou de 11 a 20% (Figura 3D), o que equivale a uma média de 15% da R_g para todo o período experimental, com menor expressividade no período II (“chuvoso”) (Tabela 1). Esse resultado deve-se a leve diminuição da R_r por causa do aumento da turgidez das plantas, que se tornarem mais escuras nessa época, uma vez que quantidades significativas de água nos vegetais mudam a coloração de sua estrutura para tons mais verdes. Além disso, o solo da área estava mais escuro por passar mais tempo úmido, diminuindo, assim, o albedo da superfície (Querino et al., 2006).

Tabela 1 – Valores médios dos fluxos do balanço de radiação e suas partições para os dias considerados como válidos pelo método de Perez et al. (1999), referentes ao período de 10/12/2015 a 10/12/2016, e divididos conforme as diferentes condições de disponibilidade hídrica proporcionada pela precipitação pluviométrica local durante essa época (I - período “seco-chuvoso” de 10/12/2015 a 06/01/2016; II - período “chuvoso” de 07/01 a 01/03/2016; III - período “chuvoso-seco” de 02/03 a 26/07/2016 e IV - período “seco” de 27/07 a 10/12/2016), em uma área de cultivo com a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] no município de Floresta, Pernambuco

Componentes	Períodos			
	I (“seco-chuvoso”)	II (“chuvoso”)	III (“chuvoso- seco”)	IV (“seco”)
Rg	20,86 ^{ab}	19,15 ^{ab}	18,55 ^b	22,04 ^a
Rn	12,91 ^{ab}	13,38 ^a	11,96 ^b	13,46 ^{ab}
Rr	3,82 ^a	2,77 ^b	2,70 ^b	3,50 ^a
BOC	17,04 ^{ab}	16,39 ^{ab}	15,86 ^b	18,54 ^a
BOL	-4,13 ^a	-3,01 ^a	-3,90 ^a	-5,08 ^a
(RFAa)	9,42 ^{ab}	8,59 ^{ab}	8,38 ^b	9,72 ^a
(RFAb)	3,01 ^a	2,68 ^a	2,29 ^b	2,86 ^a
fRFAinter	0,68 ^b	0,69 ^b	0,73 ^a	0,71 ^{ab}
RFA/Rg	0,45 ^a	0,45 ^a	0,45 ^a	0,44 ^b
Rn/Rg	0,62 ^{bc}	0,69 ^a	0,64 ^b	0,61 ^c
Rr/Rg (albedo)	0,18 ^a	0,14 ^b	0,15 ^b	0,16 ^a

*Média seguida pela mesma letra na horizontal não difere estatisticamente do teste de Dunn, ao nível de 5% de probabilidade.

Por sua vez, o desempenho dos valores RFA incidente (RFAa) também seguiram o comportamento da Rg ao longo dos períodos (Figura 3B), com uma média de 9,02 MJ m⁻² dia⁻¹, em que a relação RFA/Rg pouco variou, apresentando média de 45% da Rg (Tabela 1). Por outro lado, a RFA incidente, que chegou abaixo da cultura (RFAb), sofreu influência do índice de área do cladódio (IAC) (Figura 2), com valores mais elevados nas épocas de menor IAC. No entanto, ocorreu o contrário quando o IAC aumentou (Tabela 1), expondo certa linearidade do seu comportamento nos períodos I, II e início do período III. Finalmente, em sequência, ocorreu redução até o término de III e aumento novamente no período IV (Figura 3B).

Assim, a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (fRFAinter) foi fortemente influenciada pelo desempenho do IAC, com uma elevada atuação no período III. Nessa época, ocorreu a maior diferença entre a RFAa e RFAb (Figura 3B), principalmente por causa da maior taxa média do índice de área do cladódio (IAC), o que proporcionou menor valor do RFAb (Tabela 1).

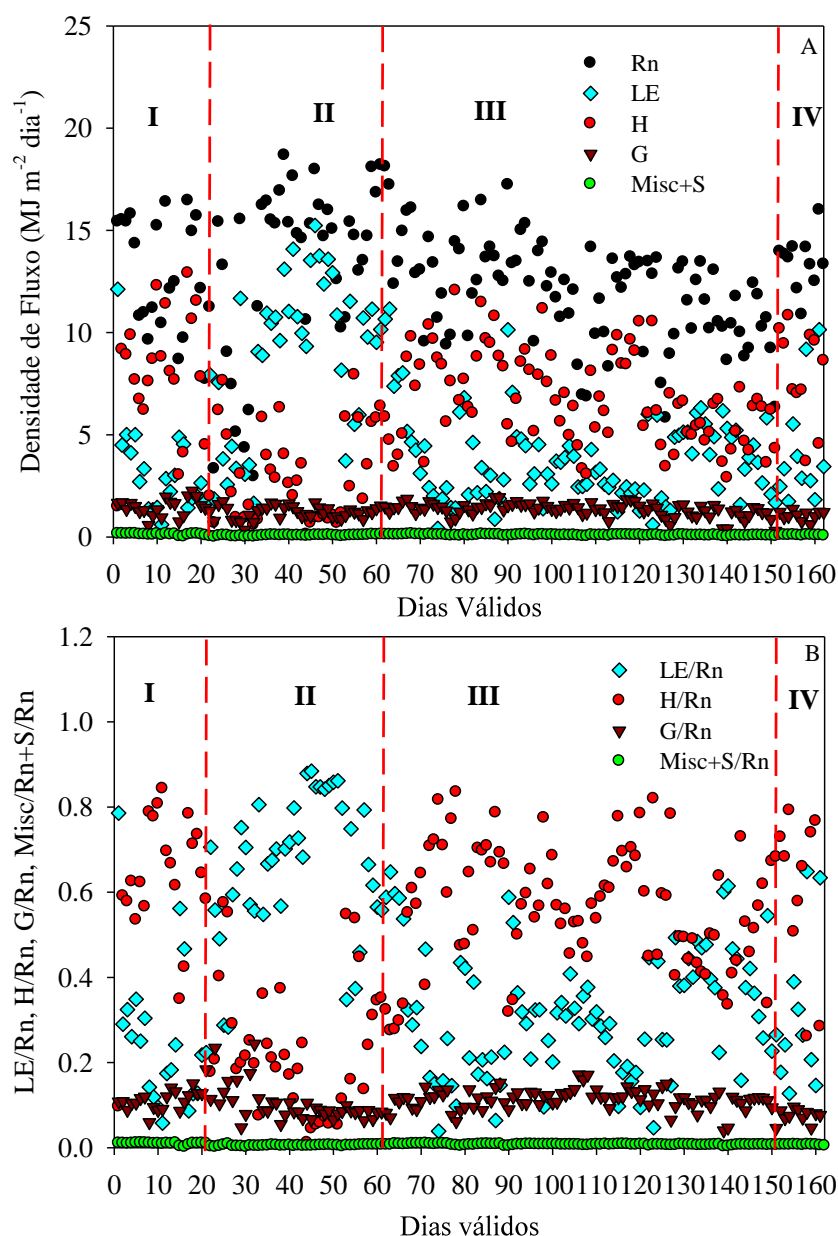


Figura 4 – Comportamento dos fluxos do balanço de energia e suas partições para os dias considerados como válidos pelo método de Perez et al. (1999), referentes ao período de 10/12/2015 a 10/12/2016, e divididos conforme as diferentes condições de disponibilidade hídrica proporcionada pela precipitação pluviométrica local durante essa época (I - período “seco-chuvoso” de 10/12/2015 a 06/01/2016; II - período “chuvoso” de 07/01 a 01/03/2016; III - período “chuvoso-seco” de 02/03 a 26/07/2016 e IV - período “seco” de 27/07 a 10/12/2016), em uma área de cultivo com a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] no município de Floresta, Pernambuco.

Quanto ao balanço de energia, os desempenhos e magnitudes dos seus fluxos e suas partições nos dias considerados como válidos em cada período de disponibilidade hídrica foram expressos graficamente na Figura 4. Constatou-se que os valores do calor latente (LE) superaram somente os do calor sensível (H) no período II, época considerada como “chuvosa”, apresentando ao longo do ciclo valores diários que variaram entre 0,42 (período III) a 15,24 MJ m⁻² dia⁻¹ (período II) (Figura 4A), o que representa cerca de 4 e 88% do Rn, respectivamente (Figura 4B).

Já o H teve uma amplitude de 0,13 a 12,91 MJ m⁻² dia⁻¹ ao longo do ciclo, nos períodos I e II (Figura 4A), que é cerca de 1 e 84% da energia disponível, respectivamente (Figura 4B), com valores superiores aos do LE nos períodos I, III e IV, no qual a maior parte da energia disponível nestas temporadas foi mais utilizada para o aquecimento do ar. Esse comportamento de superioridade dos fluxos de LE ou H está diretamente associado à quantidade de água disponível no sistema (Souza et al., 2008; Silva et al., 2011).

Os fluxos de calor no solo (G) e o estoque de energia na biomassa e armazenamento no dossel da cultura, além do armazenamento de calor no solo (Misc+S), tiveram valores diários com menor expressividade, variando de 0,29 a 2,25 MJ m⁻² dia⁻¹ para o G, nos períodos III e II, o que representa cerca de 4 e 24% do Rn, respectivamente. O componente Misc+S apresentou amplitude de somente 0,005 a 0,16 MJ m⁻² dia⁻¹, nos períodos II e I, que é cerca de 0,15 e 1,04% do Rn, concomitantemente (Figura 4A, B).

Em termos médios, os componentes do balanço de energia apresentaram valores de Rn, LE, H, G, Misc e S na ordem de 12,9; 5,1; 6,5; 1,3; 0,1 e 0,01 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente, condicionando os valores de Rn aos períodos, conforme a disponibilidade de radiação e água na região, com maiores taxas nos períodos I, II e IV, e menor expressividade no período III (Tabela 2).

Tabela 2 – Valores médios dos fluxos do balanço de energia e suas partições para os dias considerados como válidos pelo método de Perez et al. (1999), referentes ao período de 10/12/2015 a 10/12/2016, e divididos conforme as diferentes condições de disponibilidade hídrica proporcionada pela precipitação pluviométrica local durante essa época (I - período “seco-chuvoso” de 10/12/2015 a 06/01/2016; II - período “chuvoso” de 07/01 a 01/03/2016; III - período “chuvoso-seco” de 02/03 a 26/07/2016 e IV - período “seco” de 27/07 a 10/12/2016), em uma área de cultivo com a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] no município de Floresta, Pernambuco.

Componentes	Períodos			
	I (“seco-chuvoso”)	II (“chuvoso”)	III (“chuvoso-seco”)	IV (“seco”)
Rn	12,91 ^{ab}	13,38 ^a	11,96 ^b	13,46 ^{ab}
LE	3,27 ^b	8,99 ^a	3,75 ^b	4,30 ^b
H	8,06 ^a	3,11 ^b	6,78 ^a	8,01 ^a
G	1,46 ^a	1,21 ^{ab}	1,34 ^a	1,06 ^b
Misc	0,12 ^a	0,06 ^b	0,08 ^b	0,07 ^b
S	0,004 ^{bc}	0,003 ^c	0,008 ^{ab}	0,013 ^a
LE/Rn	0,26 ^b	0,66 ^a	0,31 ^b	0,31 ^b
H/Rn	0,62 ^a	0,23 ^c	0,57 ^{ab}	0,60 ^a
G/Rn	0,11 ^a	0,10 ^b	0,11 ^a	0,08 ^b
Misc/Rn	0,009 ^a	0,005 ^c	0,006 ^b	0,005 ^{bc}
S/Rn	0,000 ^{bc}	0,000 ^c	0,001 ^{ab}	0,001 ^a

*Média seguida pela mesma letra na horizontal não difere estatisticamente do teste de Dunn, ao nível de 5% de probabilidade

Semelhantemente ao comportamento dos valores diários de LE, a conduta média desse componente também foi maior no período II, devido à máxima disponibilidade hídrica da época, a qual aumentou a porcentagem de energia disponível para utilização no processo de evapotranspiração. Em situações de maiores níveis de disponibilidade hídrica, a taxa de evapotranspiração dessa espécie aumenta, isso porque plantas MAC podem abrir os estômatos para absorver CO₂ durante a manhã e final da tarde (Black; Osmond, 2003; Winter et al., 2008). Essa situação hídrica potencializa, dessa forma, a sua perda para a atmosfera e, conseqüentemente, a sua evapotranspiração. Agora em situações de déficit, elas abrem somente os seus estômatos no horário noturno, período que possui temperaturas menores, tornando essa estratégia o fator primordial para a conservação de água (NOBEL, 2001).

Para os componentes do H, G e Misc, os mesmos tiveram uma maior expressão no período I, momento caracterizado pelo significativo nível do saldo de radiação e de pouca disponibilidade hídrica, que favoreceram a elevação desses fluxos. No entanto, para o componente S, o período IV foi mais expressivo, devido a menor disponibilidade de água entre os períodos, junto com o elevado nível de radiação solar global (Tabela 2)

e queda significativa do IAC. Este último deixou o solo desprotegido da radiação incidente (Figura 2), favorecendo consideravelmente o aumento deste fluxo.

As taxas da partição do saldo de radiação na forma de calor latente (LE/Rn), calor sensível (H/Rn), calor no solo (G/Rn) e, adicionalmente, estoque de energia na biomassa e armazenamento no dossel da cultura somado com o armazenamento de calor no solo (Misc/Rn + S/Rn) apresentaram valores médios de 0,38; 0,50; 0,10 e 0,01%, respectivamente. Esses resultados demonstram que a maior parte do saldo de radiação no cultivo de palma forrageira foi utilizada no fluxo de calor sensível (H). Assim, ao longo dos períodos, as partições dos fluxos LE e H responderam conforme a disponibilidade de água e radiação (Tabela 2), além da abertura e fechamento dos estômatos da planta para controlar a perda de água para o ambiente, refletindo no seu crescimento (Figura 2).

O comportamento de crescimento da palma forrageira, observado pela análise do seu IAC (Figura 2), influenciou nos padrões dos fluxos do balanço de energia, em que o seu aumento nos períodos I e II elevou os valores de densidade do fluxo do calor latente (LE) e diminuiu o do fluxo de calor sensível (H). No entanto, os mesmos se inverteram bruscamente no período III e IV (Tabela 2) por causa da diminuição do IAC (Figura 2). Esse comportamento está atrelado à redução da umidade no ambiente nessas épocas, que paralisaram o crescimento e a turgidez dos cladódios, diminuindo estes índices e alterando o comportamento dos fluxos. Essa diminuição do IAC no último período pode ter também proporcionado a redução dos valores do Misc e do G (Tabela 2), ficando mais energia disponível para o processo do aquecimento do ar (H) e para o armazenamento de calor no solo (S).

Souza et al. (2008), ao analisar o índice de área foliar (IAF) para a cultura do abacaxi, espécie MAC, verificaram um desempenho semelhante ao do presente estudo, em que as curvas das densidades de fluxos de energia acumuladas mudaram conforme o IAF. Assim, ocorreu elevação do LE e diminuição do H em função do aumento do IAF. Em seguida, estes fluxos atingiram valores elevados com taxas máximas de IAF, sendo que, no entanto, o G diminuiu com a elevação do índice.

Quanto à média da variação horária diurna dos fluxos do balanço de energia e da razão de Bowen, em cada período de análise, estes podem ser observados na Figura 5A. O saldo de radiação (Rn) apresentou comportamento semelhante em todos os períodos, com média de 276 W m^{-2} , sendo maior no período IV (288 W m^{-2}).

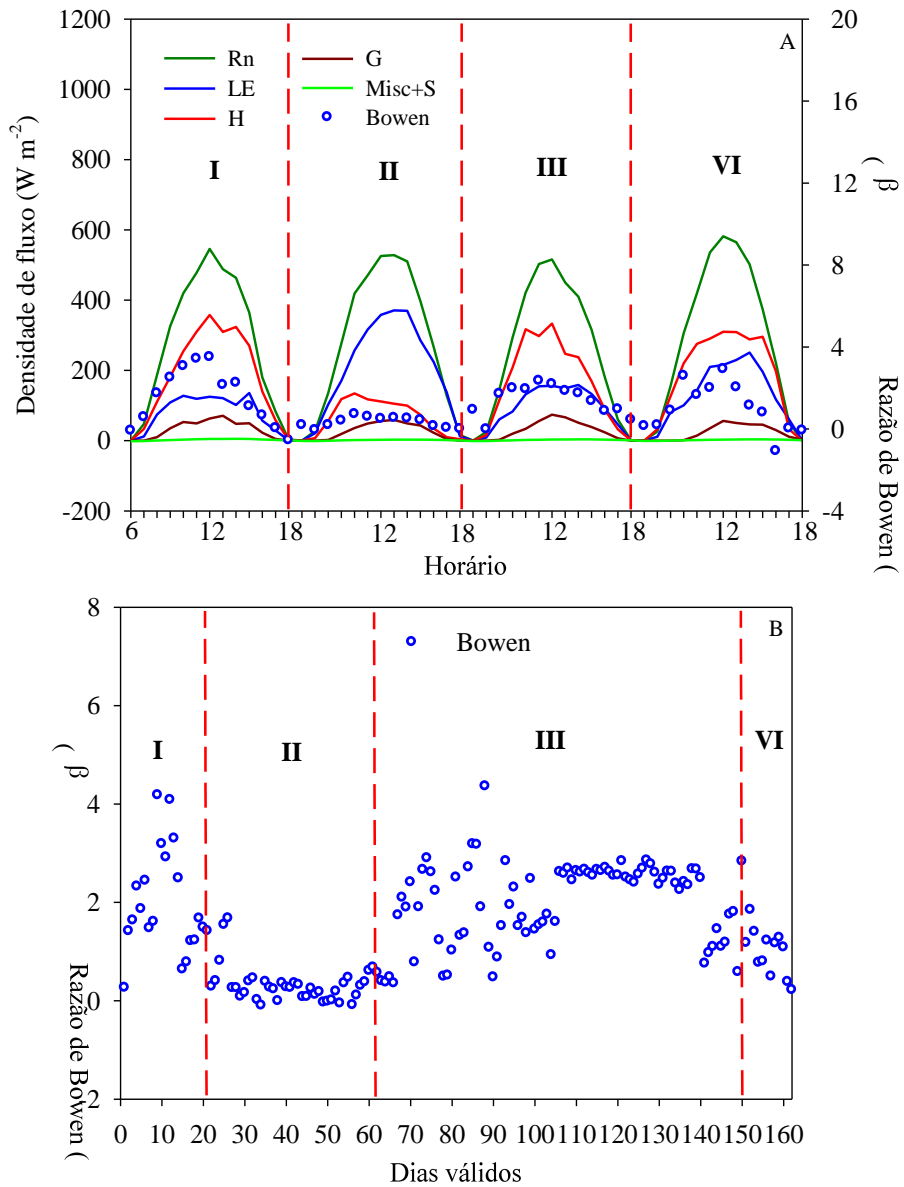


Figura 5 – Média horária diurna e diária dos fluxos do balanço de energia para os dias considerados como válidos pelo método de Perez et al. (1999), referentes ao período de 10/12/2015 a 10/12/2016, e divididos conforme as diferentes condições de disponibilidade hídrica proporcionada pela precipitação pluviométrica local durante essa época (I - período “seco-chuvoso” de 10/12/2015 a 06/01/2016; II - período “chuvoso” de 07/01 a 01/03/2016; III - período “chuvoso-seco” de 02/03 a 26/07/2016 e IV - período “seco” de 27/07 a 10/12/2016), em uma área de cultivo com a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] no município de Floresta, Pernambuco.

O fluxo de calor latente (LE), por sua vez, apresentou-se mais elevado no período II (chuvoso), com média de 202 W m^{-2} , o que já era esperado devido ter se concentrado na época chuvosa da região, e assim maior quantidade de energia foi conduzida para o processo de evapotranspiração, representando cerca de 71% do saldo de radiação dessa época. Prontamente, o fluxo de calor sensível (H) teve um desempenho contrário ao do LE, com maiores valores nos períodos de menor disponibilidade hídrica (I, III e IV), variando de 62 a 65% do R_n .

Para os fluxos de calor no solo (G) e o estoque de energia pela biomassa e armazenamento no dossel da cultura, somado ao armazenamento de calor no solo (Misc+S), ocorreram poucas variações no comportamento do período diurno, representando em média cerca de 9,8 e 0,7% do R_n , respectivamente (Figura 5A).

O componente da razão de Bowen (β), por sua vez, apresentou os seus maiores valores nos períodos de menor disponibilidade hídrica, que são o I, II e IV, com médias de 1,57; 1,41 e 1,02, respectivamente. Constatou-se no período IV a menor média, que atingiu somente 0,33 (Figura 5A).

Esse componente também teve superioridade dos seus valores nos períodos de menor disponibilidade hídrica, quando analisados diariamente, verificando a média de 1,98; 0,31; 2,0; 0,97 para os períodos I, II, III e IV, respectivamente, que equivaleu a média de 1,31 em todo o ciclo (Figura 5B).

Silva et al. (2011), analisando as contribuições do LE e H em termos da razão de Bowen (β), para cana-de-açúcar irrigada, no município de Juazeiro, BA, região que também está localizada no Semiárido brasileiro, constataram o valor médio igual a 0,27. Este valor está abaixo da média dos encontrados no presente estudo, que foi conduzido em condição de sequeiro. Porém, quando comparado com o valor do período II (0,31), época de maior disponibilidade hídrica, a razão de Bowen (β) não ficou tão diferente, demonstrando que a disponibilidade hídrica influencia na magnitude deste coeficiente.

Conclusões

1. Os padrões dos fluxos dos balanços de radiação e energia na cultura da palma forrageira sofreram muita influência das condições meteorológicas reinantes, e tais condições foram preponderantes para o crescimento das plantas, levando a manter mais ou menos energia no sistema, conforme o aumento ou diminuição do índice de área do cladódio;
2. A elevação do índice de área do cladódio influenciou significativamente na dinâmica do balanço de radiação, especialmente no período considerado como “chuvoso”. Nesse período,

os valores elevados de IAC e a maior quantidade de vapor d'água mantiveram mais energia no sistema, influenciando expressivamente na diminuição da radiação refletida e na radiação fotossinteticamente ativa que chega abaixo da cultura (RFAb), o que aumenta a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada;

3. A baixa disponibilidade hídrica na região ao longo do ciclo provocou efeitos consideráveis nos comportamentos do balanço de energia, sendo em média mais significativo para o fluxo de calor sensível (50%), vindo em sequência o fluxo de calor latente (38%), fluxo de calor no solo (10%) e o estoque de energia na biomassa e armazenamento no dossel da cultura, além do armazenamento no dossel da cultura (1%).

Referências Bibliográficas

Adli, B.; Boutekraht, A.; Touati, M.; Bakria, T.; Touati, A.; Bezini, E. Phenotypic diversity of *Opuntia ficus indica* (L.) MILL. in the Algerian steppe. **South African Journal of Botany**, v.109, p. 66-74, 2017.

Black, C.C.; Osmond, C.B. Crassulacean acid metabolism photosynthesis: 'working the night shift'. **Photosynthesis Research**, v.76, p.329-341, 2003.

Consoli, S.; Inglese, G.; Inglese, P. Determination of evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) orchard in a Semi-arid Environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, p.680-690, 2013.

Dicken, U.; Cohen, S.; Tanny, J. Examination of the Bowen ratio energy balance technique for evapotranspiration estimates in screenhouses. **Biosystems Engineering**, v.114, p.397-405, 2013.

Gondim, P.S.S.; Lima, J.R.S.; Antonino, A.C.D.; Hammecker, C.; Silva, R.A.B.; Gomes, C.A. Environmental control on water vapour and energy exchanges over grasslands in semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.3-8, 2015.

Hirano, T.; Suzuki, K.; Hirata, R. Energy balance and evapotranspiration changes in a larch forest caused by severe disturbance during an early secondary succession. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.232, p.457-468, 2017.

Holland, S.; Heitman, J.L.; Howard, A.; Sauer, T.J.; Giese, W.; Ben-Gal, A.; Agam, N. Micro-Bowen ratio system for measuring evapotranspiration in a vineyard interrow. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.177, p. 93-100, 2013.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. **Normais climatológicas do Brasil 1960-1991**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

Kool, D.; Havlin, J. Micro-Bowen ratio system for measuring evapotranspiration in a vineyard interrow. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.177, p.93-100, 2013.

- Kool, D.; Kustas, W.P.; Ben-Gal, A.; Lazarovitch, N.; Heitman, J.L.; Sauer, T.J.; Agam, N. Energy and evapotranspiration partitioning in a desert vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.218-219, p.277-287, 2016.
- Kyriacou, M.C.; Emmanouilidou, M.G.; Soteriou, G.A. Asynchronous ripening behavior of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) cultivars with respect to physicochemical and physiological attributes. **Food Chemistry**, v.211, p.598-607, 2016.
- Lefsih, K.; Delattre, C.; Pierre, G.; Michaud, P.; Aminabhavi, T.M.; Dahmoune, F.; Madani, K. Extraction, characterization and gelling behavior enhancement ofpectins from the cladodes of *Opuntia ficus indica*. **International Journal of Biological Macromolecules**, v.82, p.645-652, 2016.
- Lewis, D.A.; Nobel, P.S. Thermal energy exchange model and water loss of a barrel cactus, *Ferocactus acanthodes*. **Plant Physiol.**, v.60, p.609-616, 1997.
- Li, Z.; Lyu, S.; Ao, Y.; Wen, L.; Zhao, L.; Wang, S. Long-term energy flux and radiation balance observations over Lake Ngoring, Tibetan Plateau. **Atmospheric Research**, v.155, p.13-25, 2015.
- Nobel, P.S.; Bobich, E. Initial net CO₂ uptake responses and root growth for a CAM community placed in a closed environment. **Annals Botany**, v. 90, p. 593-598, 2002.
- Nobel, P.S. Biologia ambiental. In: BARBERA, G.; INGLESE, P. **Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira**. João Pessoa, PB: SEBRAE-PB, 2001. 300 p.
- Pereira, P.C.; Silva, T.G.F.; Zolnier, S.; Morais, J.E.F.; Santos, D.C. Morfogênese da palma forrageira irrigada por gotejamento. **Revista Caatinga**, v. 28, p.184-195, 2015.
- Perez, P.J.; Castellvi, F.; Ibañez, M.; Rosell, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.
- Pimienta-Barrios, E.; Zañudo-Hernández, J.; Nobel, P.S. Effects of young cladodes on the gas exchange of basal cladodes of *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae) under wet and dry conditions. **International Journal of Plant Sciences**, v.166, p.1-8, 2005.
- Podda, L.; Santo, A.; Mayoral, C.L.O.; Bacchetta, G. Seed germination, salt stress tolerance and seedling growth of *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae), invasive species in the Mediterranean Basin. **Flora**, v.229, p.50-57, 2017.
- Queiroz, M.G.; Silva, T.G.F.; Zolnier, S.; Silva, S.M.S.; Lima, L.R.; Alves, J.O. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 931-938, 2015.
- Querino, C.A.S.; Moura, M.A.L.; Lyra, R.F.F.; Mariano, G.L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zênital na região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3a, p.42-49, 2006.

- Righi, E.Z.; Angelocci, L.R.; Marin, F.R. Energy balance of a young drip-irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.15, p.367-379, 2007.
- San José, J.J.; Montes, R.; Nikonova, N. Diurnal patterns of carbon dioxide, water vapour and energy fluxes in pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr. Cv. Red Spanish] field using eddy covariance. **Photosynthetica**, v. 45, p.370-384, 2007.
- Scalisi, A.; Morandi, B.; Inglese, P.; Bianco, R.L. Cladode growth dynamics in *Opuntia ficus-indica* under drought. **Environmental and Experimental Botany**, v.122, p.158-167, 2016.
- Silva, N.G.M.; Lira, M.A.; Santos, M.V.F.; Dubeux Júnior, J.C.B.; Mello, A.C.L.; Silva, M.C. Relação entre características morfológicas e produtivas de clones de palma-forrageira. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, p. 2389-2397, 2010.
- Silva, T.G.F.; Miranda, K.R.; Santos, D.C.; Queiroz, M.G.; Silva, M.C.; Cruz Neto, J.F.; Araújo, J.E.M. Área do cladódio de clones de palma forrageira: modelagem, análise e aplicabilidade. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, p. 633-641, 2014.
- Silva, T.G.F.; Moura, M.S.B.; Zolnier, S.; Soares, J.M.; Souza, L.S.B.; 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**, v.15, p.139-147, 2011.
- Silva, T.G.F.; Primo, J.T.A.; Morais, J.E.F.; Diniz, W.J.S.; Souza, C.A.A.; Silva, M.C. Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. **Revista Caatinga**, v. 28, p. 10-18, 2015.
- Snyman, H.A. A greenhouse study on root dynamics of cactus pears, *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia robusta*. **Journal of Arid Environments**, v. 65, n. 4, p. 529-542, 2006.
- Souza, C.B.; Silva, B.B.; Azevedo, P.V.; Silva, V.P.R. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.400-407, 2008.
- Tegegne, F.; Kijora, C.; Peters, K.J. Study on the optimal level of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) supplementation to sheep and its contribution as source of water. **Small Ruminant Research**, v. 72, p. 157-164, 2007.
- Teixeira, A.H.C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Moura, M.S.B.; Soares, J.M.; Ahmad, M.D.; Bos, M.G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.1524-1537, 2008.
- Wang, W.; Xiao, W.; Cao, C.; Gao, Z.; Hu, Z.; Liu, S.; Shen, S.; Wang, L.; Xiao, Q.; Xu, J.; Yang, D.; Lee, X. Temporal and spatial variations in radiation and energy balance across a large freshwater lake in China. **Journal of Hydrology**, v.511, p.811-824, 2014.

Winter, K.; Garcia, M.; Holtum, J.A.M. On the nature of facultative and constitutive CAM: environmental and developmental control of CAM expression during early growth of *Clusia*, *Kalanchoe*, and *Opuntia*. **Journal of Experimental Botany**, v. 59, p. 1829-1840, 2008.

ARTIGO 2 - Processos e controladores de transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera na cultura da palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.]

Resumo. Objetivou-se com esse trabalho avaliar na região do Semiárido brasileiro os processos e controladores da transferência de água na interface solo-planta-atmosfera, por meio do balanço de água no solo (BAS) no cultivo da palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], e os mecanismos de controle da evapotranspiração por meio da resistência da superfície (r_s), resistência aerodinâmica (r_a) e fator de desacoplamento (Ω). O campo experimental fica localizado no município de Floresta, Pernambuco, onde foi instalada uma torre micrometeorológica no centro da área para coleta de dados a partir de sensores eletrônicos acoplados na mesma. Também foram instalados 12 tubos de acesso para monitoramento do conteúdo de água no solo (CAS) e três calhas de escoamento, ambos coletaram dados utilizados na realização do BAS a cada 7 dias e agrupados mensalmente, durante o período experimental de 10 de dezembro de 2015 a 10 de dezembro de 2016. Para a avaliação dos mecanismos de controle, o período experimental foi dividido em diferentes épocas conforme o regime pluviométrico local. Constatou-se que o CAS acompanhou o comportamento da precipitação, com média $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Fator que também influenciou no comportamento dos componentes do BAS, tendo a água disponível sido mais utilizada para o armazenamento no solo e consumo da cultura, apresentando taxas de evapotranspiração real (ETr) baixas ($272,4 \text{ mm ano}^{-1}$ e $0,74 \text{ mm dia}^{-1}$). Já para os mecanismos controladores da evapotranspiração, observou-se que os valores de r_s apresentaram-se elevados nas épocas de menores níveis pluviométricos e o contrário para a r_a . Os valores obtidos do Ω indicaram que, nos períodos de maiores níveis de chuva, a cultura esteve mais “desacoplada com a atmosfera” e, para as demais épocas, os valores de Ω estiveram mais próximos de zero, sugerindo estarem “acoplado com a atmosfera”.

Palavras-chave: Balanço de água no solo, Resistência da superfície, Resistência aerodinâmica, Fator de desacoplamento, Semiárido brasileiro.

Processes and controllers of water transfer in the soil-palm-atmosphere system in cactus pear [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.]

Abstract. The objective of this work was to evaluate the processes and controllers of water transfer at the soil-plant-atmosphere interface, by means of soil water balance (BAS) in cactus pear [*Opuntia stricta* (Haw.)]. And the mechanisms of evapotranspiration control by surface resistance (r_s), aerodynamic drag (r_a) and decoupling factor (Ω). The experimental field is located in the municipality of Floresta, Pernambuco, where a micrometeorological tower was installed in the center of the area to collect data from electronic sensors coupled to it. Also, 12 access tubes were installed to monitor soil water content (CAS) and three runners, both collecting data used to perform BAS every 7 days and grouped monthly during the experimental period of December 10, 2015 to December 10, 2016. For the evaluation of the control mechanisms, the experimental period was divided in different times according to the local rainfall regime. It was verified that the CAS monitored the behavior of the precipitation, with an average of $0.06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Factor that also influenced the behavior of BAS components, with the available water being more used for soil storage and crop consumption, presenting low real evapotranspiration (ETr) rates ($272.4 \text{ mm year}^{-1}$ and 0.74 mm day^{-1}). As for the control mechanisms of evapotranspiration, it was observed that the values of r_s were elevated in times of lower rainfall levels and the opposite for

r_a . The values of Ω indicated that the periods of higher rainfall levels were more "uncoupled with the atmosphere", and for the other epochs the values of Ω were closer to zero, suggesting that they were "coupled to the atmosphere".

Key words: Soil water balance, Surface resistance, Aerodynamic resistance, Decoupling factor, Brazilian semi-arid.

Introdução

O Semiárido nordestino é uma região do Brasil marcada por elevada variação espaço temporal das chuvas, além de baixos valores ao longo do ano, que variam em torno de 350 a 700 mm ano⁻¹, com elevada demanda atmosférica (>1800 mm ano⁻¹) e condições expressivas de temperaturas ar (média de 28°C) (ANDRADE et al., 2010).

Geralmente, a concentração das chuvas fica entre os meses de janeiro a abril e, nos outros meses, não apresentam eventos pluviométricos significativos. Nesse período de menores níveis de precipitação, a demanda evaporativa da atmosfera torna-se muito elevada, provocando estresse hídrico nas espécies vegetais (SOUZA et al., 2015).

Essas características climáticas do Semiárido brasileiro provocam baixa produção agropecuária na região e, especificamente, para atender as demandas por forragens, por muito tempo vem se domesticando e cultivando espécies tolerantes a essas adversidades, como é o caso da palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.).

A palma forrageira possui o metabolismo ácido das crassuláceas (MAC), que lhe proporciona mecanismos fisiológicos de resistência às condições adversas de áreas áridas e semiáridas, tolerando as condições de escassez de água, altas temperaturas e solos pobres. Dessa forma, torna-se uma importante alternativa alimentar no setor agropecuário de subsistência nordestina e mundial (HERNÁNDEZ et al., 2004; TEGEGNE et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2010).

Culturalmente, essa planta é cultivada em sistema de sequeiro, deixando-a sujeita a modificações em suas respostas morfológicas, conforme as condições ambientais predominantes (DUBEUX JÚNIOR et al., 2006). Dentre estas, a disponibilidade de água no ambiente de cultivo, que reflete diretamente na sua interação atmosférica (SILVA et al., 2015).

O conteúdo disponível de água no solo para essa espécie vem sendo estudado nos últimos anos para se compreender a dinâmica de água nos sistemas em que ela foi exposta, disponibilizando informações que auxiliam a melhorar o seu manejo. Assim, é possível entender profundamente as suas interações com as condições atmosféricas reinantes, especificamente de sua relação de transferência do vapor d'água para o

ambiente pelo processo de evapotranspiração (SILVA et al., 2015; QUEIROZ et al., 2015; PEREIRA et al., 2017).

Além disso, a dinâmica de transferência de vapor d'água no sistema solo-planta-atmosfera está sujeita a mecanismos que atuam e controlam a evapotranspiração, sendo esses comandados pela resistência estomática das folhas do dossel e evaporação da superfície do solo (resistência da superfície, r_s), além da resistência acima da vegetação que envolve a fricção do ar e as propriedades aerodinâmicas da superfície (resistência aerodinâmica, r_a) (ALLEN et al., 1998; MATSUMOTO et al., 2008).

A avaliação da habilidade que as superfícies vegetadas têm de transferir vapor d'água para atmosfera é muitas vezes executada pela determinação do fator de desacoplamento (Ω) (MARIN; ANGELOCCI, 2011; SILVA et al., 2012), composto pela junção das condições climáticas representadas pela resistência aerodinâmica (r_a), e pelas características da superfície que formam a resistência da superfície (r_s) (NICOLÁS et al., 2008).

As magnitudes dos valores de Ω variam conforme o intervalo $0 < \Omega < 1$, sendo que valores próximos ou iguais a zero indicam que a evapotranspiração é dependente da velocidade do ar e do déficit de pressão de vapor, considerando, assim, que superfície vegetada está “acoplada com a atmosfera”. No entanto, quando os valores do fator de desacoplamento estão próximos de um, a evapotranspiração é mais sensível ao saldo de radiação solar, e, neste caso, considera-se que a superfície está “desacoplada com a atmosfera” (McNAUGHTON; JARVIS, 1983; SILVA et al., 2012).

Tratando-se especificamente da palma forrageira, esta planta abre os seus estômatos durante a noite para diminuir a perda de água por transpiração, que é o período de menor demanda atmosférica, e fecha durante o dia. Ela também pode se comportar fisiologicamente diferente em condições favoráveis de disponibilidade hídrica, abrindo os seus estômatos durante parte do horário diurno (BLACK; OSMOND, 2003; WINTER et al., 2008). Assim, o comportamento e os controladores do processo de transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera nessa espécie podem ser totalmente modificados, conforme alterações das condições meteorológicas, tornando essas informações indispensáveis para sua compreensão e manejo.

Dessa forma, o presente estudo teve por objetivos avaliar os processos e os controladores da transferência de água na interface solo-planta-atmosfera, por meio da quantificação dos componentes do balanço de água no solo no cultivo da palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], bem como também avaliar os mecanismos de

controle da evapotranspiração através da resistência da superfície, resistência aerodinâmica e fator de desacoplamento nas condições de disponibilidade hídrica no Semiárido brasileiro.

Material e Métodos

Área experimental e cultura

O experimento foi conduzido na Fazenda Algodões (Latitude: 8,30°S; Longitude: 38,51°O e Altitude: 380,83 m), município de Floresta, estado de Pernambuco, região semiárida do Nordeste brasileiro. Na área experimental, foi plantada a palma forrageira, cultivar Orelha de Elefante Mexicana [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], em 02 de agosto de 2014, no espaçamento de 2 m entre fileiras e 0,5 m entre plantas. Nessa área, a relação bordadura:altura dos sensores foi de 40:1 na direção predominante do vento.

Os dados experimentais foram coletados a partir de 10 de dezembro de 2015, no segundo ano de cultivo da espécie, estendendo-se até 10 de dezembro de 2016. Durante esse período, a área foi conduzida em sistema de sequeiro e sempre que necessário recebeu capinas e aplicação de defensivos para o controle da cochonilha de escama (*Diaspis echinocacti* Bouché).

Instrumentação micrometeorológica

Os dados micrometeorológicos foram adquiridos a partir de uma torre com quatro metros de altura, localizada no centro do campo experimental. Os sensores eletrônicos foram: dois psicrômetros aspirados, cada um foi composto por dois termopares Cobre-Constantan do tipo T, estando o primeiro psicrômetros instalado à altura de $2 z_{om}$ do topo do dossel da cultura (em que z_{om} o é parâmetro de rugosidade da superfície para o momentum, m), enquanto o segundo, à distância de 0,75 m acima do primeiro, para aquisição das temperaturas do bulbo seco, t_{bs1} e t_{bs2} (°C) e temperaturas do bulbo úmido, t_{bu1} e t_{bu2} (°C), nos dois níveis de altura, respectivamente; dois piranômetros para medição da radiação solar global incidente (R_g , MJ m⁻² d⁻¹; CS 300 Pyranometer, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e refletida (R_r , MJ m⁻² d⁻¹; CMP3 Pyranometer, Kipp & Zonen, Bohemia, USA), este último posicionado de forma invertida; um sensor quântico para medição da radiação fotossinteticamente ativa (RFA, MJ m⁻² d⁻¹; LI-190SB Quantum Sensor, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA); três sensores PAR lineares, para medição da radiação fotossinteticamente ativa interceptada

(RFA, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; SQ-321 Calibration Line Quantum Net10 sensors, Apogee, Logan, Utah, USA), sendo um posicionado acima da cultura, para medição da RFA incidente (RFAa, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), e os outros dois no solo próximos às plantas, de forma transversal em relação a fileira de cultivo, para medição da RFA que chega abaixo da cultura (RFAb, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); um saldo radiômetro para a aquisição do balanço de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; NR-LITE 2 Net radiometer, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA); um pluviômetro para aquisição dos dados de precipitação pluviométrica (mm; TE525MM-L34, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA); um anemômetro (03002 R.M. Young Wind Sentry Set, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA), para obtenção dos dados de velocidade (m s^{-1}) e direção dos ventos (graus); e 12 termopares Cobre-Constantan do tipo T, para adquirir as temperaturas dos cladódios.

Além dos sensores acoplados à estrutura da torre, foram instalados sensores na superfície do solo: dois fluxímetros na profundidade de 0,05 m, para medição do fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; HFP01SC Self-Calibrating Heat Flux Sensor, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e dois sensores para medir a temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$; TCAV-L50, Averaging soil thermocouple probe, Campbell Scientific), nas profundidades de 0,15 e 0,30 m.

Todos sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados (CR1000-ST-SW-NC, Campbell Scientific) e a um multiplexador (AM16/32B-ST-SW), que realizava medições a cada 60 segundos e armazenava os valores médios em intervalos de 10 minutos.

Transferência de água na interface solo-planta-atmosfera

Balanço de água no solo

A dinâmica de água na interface solo-planta-atmosfera foi analisada a partir da aplicação do método do balanço de água no solo (BAS), realizado por meio da determinação dos componentes que representam as entradas e saídas de água no solo, considerando-se o volume de controle limitado a profundidade de 0,50 m.

Na determinação dos componentes do BAS, as entradas e saídas de água por escoamento subsuperficial (ΔESS) foram desprezadas devido à baixa declividade da área, havendo desta forma desprezível perda de água por esse componente. Também não foi considerada a irrigação (I), devido o experimento ter sido manejado em sistema de sequeiro.

Assim, a equação do balanço de água no solo pode ser descrita por:

$$\Delta A = P \pm R \pm Q - ET$$

(1)

em que ΔA é a variação do armazenamento de água no solo (mm), P é a precipitação pluviométrica (mm), R é o escoamento superficial (mm), Q é o fluxo vertical de água no solo (mm) e ET representa a evapotranspiração (mm).

A variação do armazenamento (ΔA , mm) foi obtida pela diferença dos valores de lâmina de água determinadas a cada 0,10 m e integrados até 0,50 m:

$$\int_{n=1}^7 \Delta A = A_f - A_i$$

(2)

em que A_f e A_i são os armazenamentos de água acumulados no final e início do período, respectivamente.

O monitoramento da precipitação pluviométrica (P , mm) foi executado pela torre micrometeorológica e o escoamento superficial (R , mm) consistiu na quantificação da água de três calhas de escoamento instaladas no centro do campo experimental.

O fluxo vertical de água no solo (Q , mm), por sua vez, é representado pela drenagem profunda (DP , mm; sinal negativo) e/ou ascensão capilar (AC , mm; sinal positivo), determinados pela equação proposta por Darcy-Buckingham (LIBARDI, 2005):

$$Q = -K(\theta) \frac{\Delta \psi_t}{\Delta z}$$

(3)

em que $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo ($m h^{-1}$), $\Delta \psi_t / \Delta z$ o gradiente do potencial de água no solo ($m m^{-1}$) entre as camadas de 0,40 e 0,60 m.

O parâmetro $K(\theta)$ foi estimado em função do conteúdo de água no solo, usando a equação abaixo, calibrada para a profundidade de 0,50 m, por meio do método do perfil instantâneo, conforme descrito por Araújo Primo et al. (2015):

$$K(\theta) = K_o e^{\gamma(\theta - \theta_o)}$$

(4)

em que K_o é condutividade hidráulica no solo saturado ($cm h^{-1}$), θ é o valor da umidade de saturação ($cm^3 cm^{-3}$), γ é o coeficiente angular da reta $\ln K$ em função de θ .

O gradiente do potencial total de água no solo ($\Delta \psi_t / \Delta z$), entre as camadas de 0,40 e 0,60 m, foi estimado pelo potencial total de água no solo (ψ_t), para ambas as

profundidades, para todos os 12 tubos de acesso instalados no centro da área, por meio dos valores do conteúdo de água no solo e da equação abaixo ajustada por Araújo Primo et al. (2015):

$$\psi r_t = \alpha e^{-\beta \theta} \quad (5)$$

em que α e β são parâmetros adimensionais ajustados, por meio do método do perfil instantâneo nas profundidades de 0,40 m (2,829 e 2,123) e 0,60 m (1,582 e 1,022).

Por fim, a evapotranspiração (ET, mm) foi quantificada a partir do resíduo da equação do balanço de água no solo. Os componentes do balanço de água no solo foram calculados a cada 7 dias, e agrupados mensalmente, conforme a quantidade de intervalos de leituras do monitoramento do conteúdo de água no solo feitas a cada mês (Tabela 1).

O monitoramento do conteúdo de água no solo (CAS) ficou a cargo da utilização de uma sonda capacitiva (Diviner 2000 SentekPty Ltda., Austrália), a qual se trata de um sensor portátil constituído de um sistema de aquisição de dados, que uma vez inserido em um tubo de acesso instalado no solo fornece de maneira rápida o conteúdo de água a cada 0,1m.

Os tubos de acesso, que foram anteriormente citados, possuem diâmetro que permitem um mínimo de espaço entre o sensor e sua parede, além de serem de PVC (policloreto de vinila), o que possibilita a propagação do campo magnético ($\approx 0,10$ m radialmente) no solo. Eles foram enterrados “em prumo” até a profundidade de 0,6 m e em seguida vedados nas suas extremidades, para impedir a entrada de água. Foram instalados 12 tubos no centro da área experimental, distribuídos em 4 grupos espaçados entre si a 4 m, contendo cada grupo 3 tubos que ficaram distanciados das plantas em 0,5; 1,0 e 1,5 m.

Para analisar a variabilidade da evapotranspiração da cultura e de sua relação com a demanda atmosférica local ao longo dos períodos (Tabela 1), utilizou-se a relação E_{Tr}/E_{To} obtida pela razão entre a evapotranspiração real (E_{Tr}) da palma forrageira, determinada pelo resíduo do balanço de água no solo e a evapotranspiração de referência (E_{To}), a partir do método de Penman-Monteith parametrizado no Boletim 56 da FAO.

Tabela 1 – Datas de início e término e quantidade de leituras mensais do monitoramento do conteúdo de água no solo, durante o período de 10 de dezembro de 2015 a 10 de dezembro de 2016 no município de Floresta, Pernambuco, Semiárido brasileiro

Períodos	Data de início	Data de término	Quantidade de leituras
1	12/12/2015	26/12/2015	3
2	02/01/2016	30/01/2016	5
3	06/02/2016	27/02/2016	4
4	05/03/2016	26/03/2016	4
5	02/04/2016	30/04/2016	5
6	07/05/2016	28/05/2016	4
7	04/06/2016	25/06/2016	4
8	02/07/2016	30/07/2016	5
9	06/08/2016	27/08/2016	4
10	03/09/2016	24/09/2016	4
11	01/10/2016	29/10/2016	5
12	05/11/2016	26/11/2016	4
13	03/12/2016	10/12/2016	2

Mecanismos controlares do processo de evapotranspiração

Para determinação dos mecanismos controladores da evapotranspiração na palma forrageira, foram usados os componentes de resistência a fim de distinguir os efeitos dos elementos abióticos (micrometeorológicos) dos bióticos na cultura (FRAGA et al., 2015). Considerou-se como fatores abióticos a resistência aerodinâmica (r_a), o saldo de radiação (Rn) e o déficit de pressão de vapor d'água na atmosfera (DPV), e como elementos bióticos a resistência da superfície (r_s) e o controle exercido pelos estômatos sobre a liberação da água para a atmosfera.

A determinação da resistência aerodinâmica (r_a ; $s\ m^{-1}$), foi representado por (JACOBS et al., 2002):

$$r_a = \frac{\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \ln \left(\frac{z-d}{z_{ov}} \right)}{k^2 u}$$

(6)

em que z é a altura de medição da velocidade do vento (m); u é a velocidade do vento ($m\ s^{-1}$); d é a altura de deslocamento (m), aproximadamente $0,67z_{veg}$; z_{veg} é a altura da vegetação (m); z_0 é a altura de rugosidade para momento, que é perto de $0,1 z_{veg}$; z_{ov} é a altura da rugosidade do vapor de água (m), cerca de $0,1z_0$; k é a constante de Von Karman (0,4).

Em sequência, a resistência da superfície (r_s , s m^{-1}) foi estimada a partir da inversão da equação de Penman-Monteith, seguindo (SHUTTLEWORTH, 1988; MONTEITH; UNSWORTH, 1990):

$$r_s = r_a \left(\frac{\Delta}{\gamma} \frac{H}{LE} - 1 \right) + \left(\frac{\rho_a C_p (e_s - e_a)}{\gamma LE} \right) \quad (7)$$

em que γ é a constante psicrométrica (kPa $^{\circ}C^{-1}$); Δ é a tangente da curva de pressão de saturação de vapor d'água (kPa $^{\circ}C^{-1}$); ρ_a é a densidade do ar (Kg m^{-3}); $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor d'água (kPa); H é o fluxo de calor sensível (MJ $m^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ou W m^{-2}) e LE é o fluxo de calor latente (MJ $m^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ou W m^{-2}), sendo os dois últimos determinados pelo método da razão de Bowen.

Os processos de transpiração dos vegetais são dependentes tanto das particularidades do dossel, quanto das características da atmosfera nas suas imediações. Para compreender essa influência mútua entre o dossel e atmosfera, foi aplicado o fator de desacoplamento (Ω) (McNAUGHTON; JARVIS, 1983), expresso por:

$$\Omega = \left(1 + \frac{\gamma}{\Delta} \frac{r_s}{r_a} \right)^{-1} \quad (8)$$

O fator Ω varia conforme o intervalo $0 < \Omega < 1$, sendo, que para valores próximos ou iguais a 0, considerado que a superfície vegetada está “acoplada com a atmosfera”. Em contraste, para valores próximos de 1, considera-se que a superfície está “desacoplada com a atmosfera” (McNAUGHTON; JARVIS, 1983; SILVA et al., 2012).

Para visualizar o comportamento diário e horário da evapotranspiração real na cultura, foi utilizada a relação entre o LE e o calor latente de evaporação (λ ; MJ kg^{-1}) (GONDIM et al., 2015):

$$ET_{BERB} = \frac{LE}{\lambda} \quad (9)$$

A determinação dos fluxos de calor latente e sensível ocorreu pelo particionamento do saldo de radiação (R_n , MJ $m^{-2} \text{ d}^{-1}$ ou W m^{-2}), expresso matematicamente como:

$$R_n = LE + H + G + (Misc + S) \quad (10)$$

em que G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ou W m^{-2}); Misc é o estoque de energia na biomassa e armazenamento no dossel da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ou W m^{-2}); e o S é o armazenamento de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ou W m^{-2}),

O fluxo de calor latente (LE) foi adquirido pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB) ($\text{DICKEN et al., 2013; GONDIM et al., 2015}$), em que:

$$\text{LE} = \frac{\text{Rn} - G}{1 - \beta}$$

(11)

em que β é a razão de Bowen (adimensional).

A estimativa da razão de Bowen (β) foi determinada pela equação psicrométrica ($\text{RIGHI et al., 2007}$):

$$\beta = \left(\frac{\Delta + \gamma \frac{t_{bu1} - t_{bu2}}{t_{bs1} - t_{bs2}}}{\gamma} \right)^{-1}$$

(12)

em que t_{bu1} e t_{bu2} são as temperaturas de bulbo úmido nos dois níveis de medida acima do dossel da cultura ($^{\circ}\text{C}$); t_{bs1} e t_{bs2} são as temperaturas de bulbo seco nos dois níveis de medida acima do dossel da cultura ($^{\circ}\text{C}$).

O estoque de energia na biomassa e armazenamento no dossel da cultura (Misc ; $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) foram calculados por uma adaptação dos procedimentos propostos por $\text{LEWIS \& NOBEL, (1977)}$, não considerando para essa determinação que a cultura assumiria um volume cilíndrico, mas uma soma do desmembramento do acúmulo da energia armazenada por cada cladódio pertencente a planta, além da energia contida no ar dentro da estrutura da planta, ao longo do tempo de análise:

$$\text{Misc} = C_{vh} V \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

(13)

em que C_{vh} é a capacidade calorífica volumétrica da quantidade de água contida nos cladódios e a capacidade calorífica volumétrica do ar dentro do dossel ($\text{J m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$); V é o volume específico da planta sobre a área de superfície (m); ΔT é a variação da temperatura entre a planta e o ar ($^{\circ}\text{C}$); e Δt é o intervalo de tempo. Por fim, os valores do fluxo de calor sensível (H) foram obtidos a partir do resíduo da Equação 10.

A avaliação dos erros, com base na estimativa dos valores de β , foi realizada pela aplicação dos critérios desenvolvidos por Perez et al. (1999), os quais caracterizam a consistência física dos dados micrometeorológicos, fundamentado nos valores do perfil de pressão de vapor d'água, nos limites de resolução dos sensores e sinais dos gradientes de pressão de vapor d'água, de temperatura.

Neste estudo, foram considerados como valores positivos de R_n e G quando os mesmos estiveram em direção à superfície, enquanto os componentes LE e H só foram identificados como positivos quando estiveram na direção oposta à superfície e aos gradientes de temperatura (Dt) e pressão de vapor d'água (De). Os gradientes foram obtidos a partir das medidas de temperatura (t) e da pressão de vapor d'água (e) do perfil atmosférico, ambas adquiridas das medidas ocorridas em duas alturas acima do dossel da cultura (z_1 e z_2), ($\Delta t = t_{bs1} - t_{bs2}$ e $\Delta e = e_1 - e_2$).

Por fim, para as estimativas dos valores diários de LE e H , foram utilizados os dados de R_n , G e β a cada 10 minutos, somente quando os valores de $R_n - G$ eram positivos. Apesar disso, aproveitaram-se apenas os dias que ofereceram pelo menos 65% dos dados de LE e H fisicamente consistente, conforme os critérios antes citados, qualificando o dia como “válido”.

Essa análise dos mecanismos controladores da evapotranspiração só considera os “dias válidos”, determinados pelo critério Perez et al. (1999), sendo ainda o intervalo de tempo desse estudo dividido conforme o regime pluviométrico registrado no campo experimental, a fim de se obter a melhor avaliação dos dados experimentais, caracterizados os períodos como “seco”, “chuvoso” e de suas transições “seco-chuvoso” ou “chuvoso-seco”.

Enquadrou-se como um dia do período “seco” quando, no intervalo de 30 dias antecedentes e subsequentes a ele, a precipitação foi menor que 20 mm e o número de dias com pelo menos 1 mm foi inferior a 5 dias. Em contraste, o período “chuvoso” foi enquadrado quando, nesse mesmo intervalo de tempo, a precipitação foi maior que 20 mm e o número de dias com pelo menos 1 mm foi superior a 5 dias. Os dias que não atendiam a esses critérios foram enquadrados nos períodos de transições “seco-chuvoso” ou “chuvoso-seco”.

Assim, foram identificados quatro períodos: “seco-chuvoso” (I; 10/12/2015 a 06/01/2016 com 51,3 mm), “chuvoso” (II; 07/01/2016 a 01/03/2016 com 142 mm), “chuvoso-seco” (III; 02/03/2016 a 26/07/2016 com 123,1 mm) e “seco” (IV; 27/07/2016 a 10/12/2016 com 2,4 mm).

Resultados e Discussão

Variáveis ambientais

A precipitação pluviométrica no campo experimental proporcionou boa oportunidade de observação do balanço de água no solo ao longo do período de estudo. Ela ficou concentrada entre os meses de dezembro de 2015 a agosto de 2016, com volume de 319,4 mm que é 52% da média (610 mm ano⁻¹) para o município de Floresta – PE (INMET, 1961-1990). O maior volume (302,2 mm) foi observado nos meses de janeiro a maio de 2016, com grande sequência de dias secos de junho a dezembro de 2016 (Figura 1A).

A radiação solar global e a temperatura média do ar apresentaram o mesmo comportamento, com médias de 20,33 MJ m² dia⁻¹ e 27,6 °C, respectivamente, apresentando elevados valores no início e término do período experimental, devido a maior incidência de radiação nessas épocas (Figura 1A e B). Já a média anual da umidade relativa do ar foi de 61,2%, com os seus maiores valores concentrados nos meses de dezembro de 2015 a julho de 2016, comportamento vinculado ao fato de que nesses meses ocorreram os maiores volumes de precipitação, elevando a umidade (Figura 1B). Por fim, a velocidade do vento apresentou uma média de 1,60 m s⁻¹, sendo mais expressiva depois do mês de julho até o final do período de análise (Figura 1A).

Balanço de água no solo

O conteúdo médio de água no solo acompanhou o comportamento da precipitação local, apresentando média de 0,06 m³ m⁻³ para todo o período de análise, com a maior taxa no mês de fevereiro de 2016 (0,11 m³ m⁻³) devido aos elevados eventos de precipitação no mês anterior e no atual (193 mm), disponibilizando, assim, mais a água no solo. Ocorreu significativa diminuição desse conteúdo a partir do mês de junho, prosseguindo até o final do período de estudo, por causa da redução nas chuvas, proporcionando média de 0,04 m³ m⁻³ nesta época (Figura 2).

Os valores dos componentes do balanço de água no solo durante o período experimental podem ser observados nas Figuras 3 e 4. Para o componente de variação do armazenamento de água no solo (DA), foi observado que ele esteve negativo na maioria dos meses, com exceção do mês de janeiro de 2016 (46,9 mm) (Figura 3A). Jian et al. (2015) também destacam um comportamento negativo do armazenamento de água no solo em ambientes semiáridos, fato que está associado à perda de água quando

a evaporação excede a precipitação. Assim, deve-se observar que a demanda atmosférica da região do Semiárido brasileiro excede $1.800 \text{ mm ano}^{-1}$, que é muito acima da precipitação média da região(ANDRADE et al., 2010).

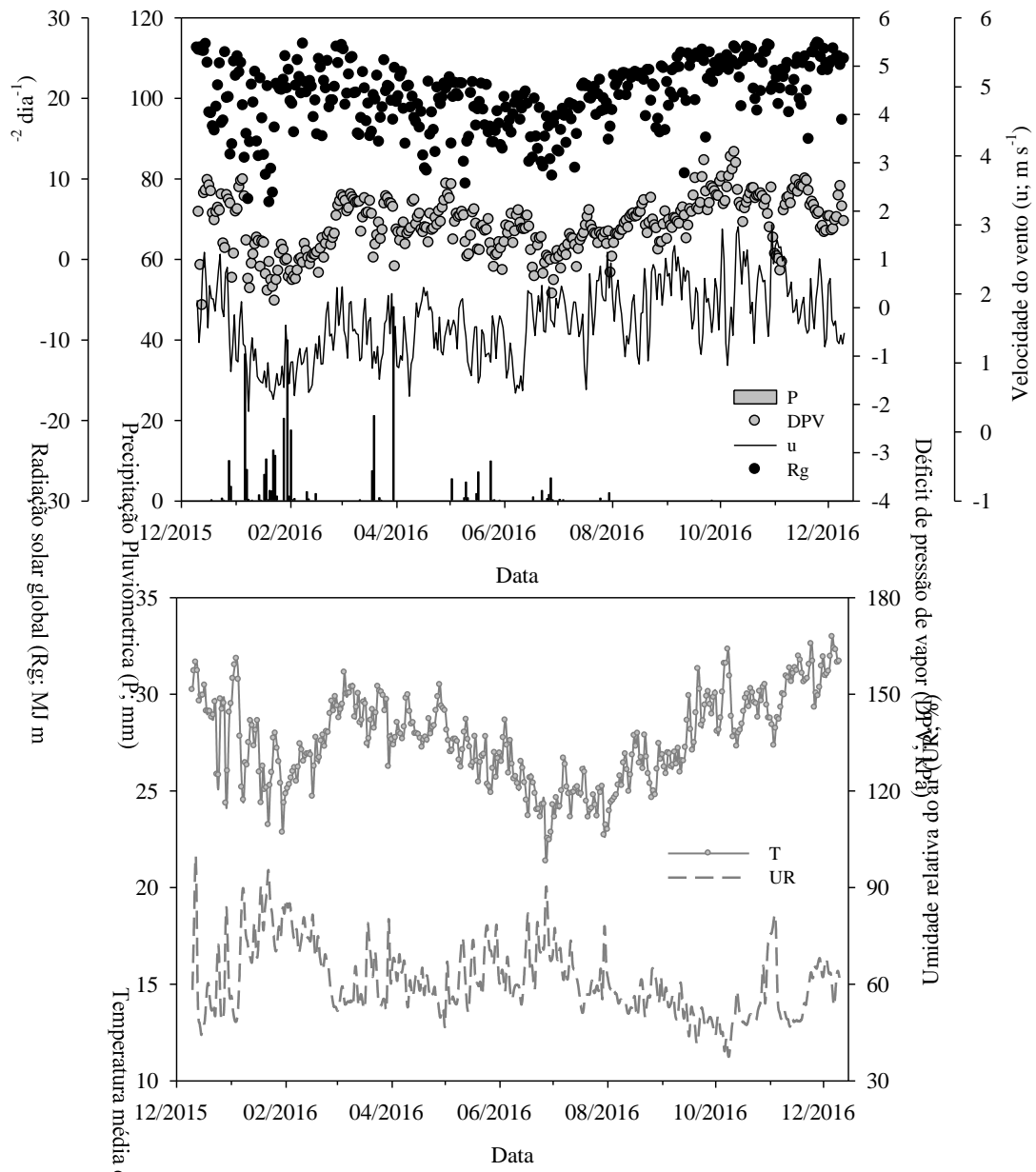


Figura 1 – Variáveis meteorológicas em uma área cultivada com a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] durante o período de 10 de dezembro de 2015 a 10 de dezembro de 2016, no município de Floresta, Pernambuco, Semiárido brasileiro.

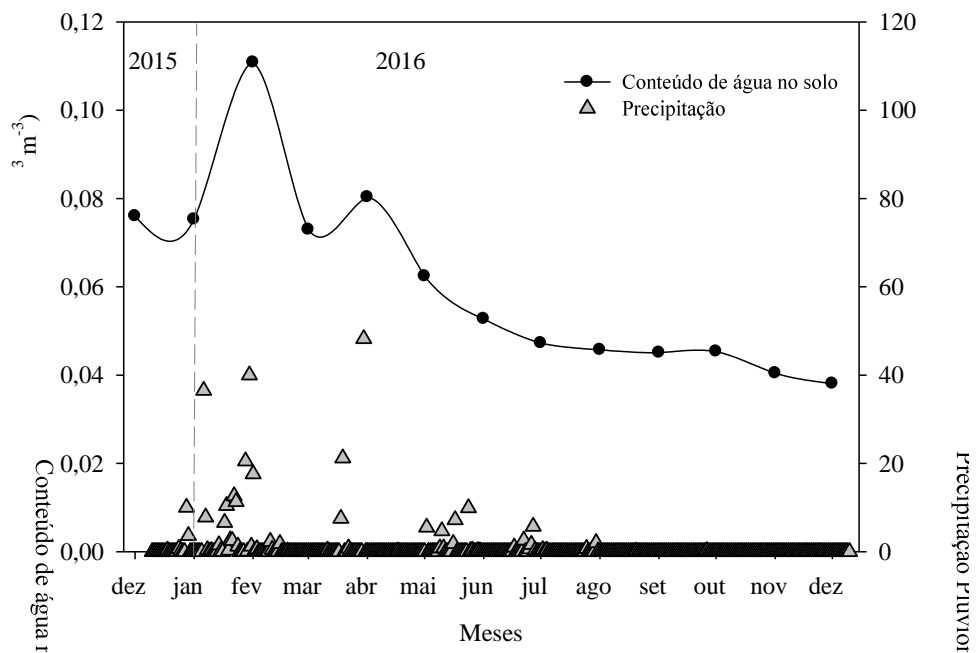


Figura 2 – Variação do conteúdo médio de água no solo entre a superfície até a profundidade de 0,50 m, em uma área cultivada com a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], durante o período de 10 de dezembro de 2015 a 10 de dezembro de 2016, no município de Floresta, Pernambuco, Semiárido brasileiro.

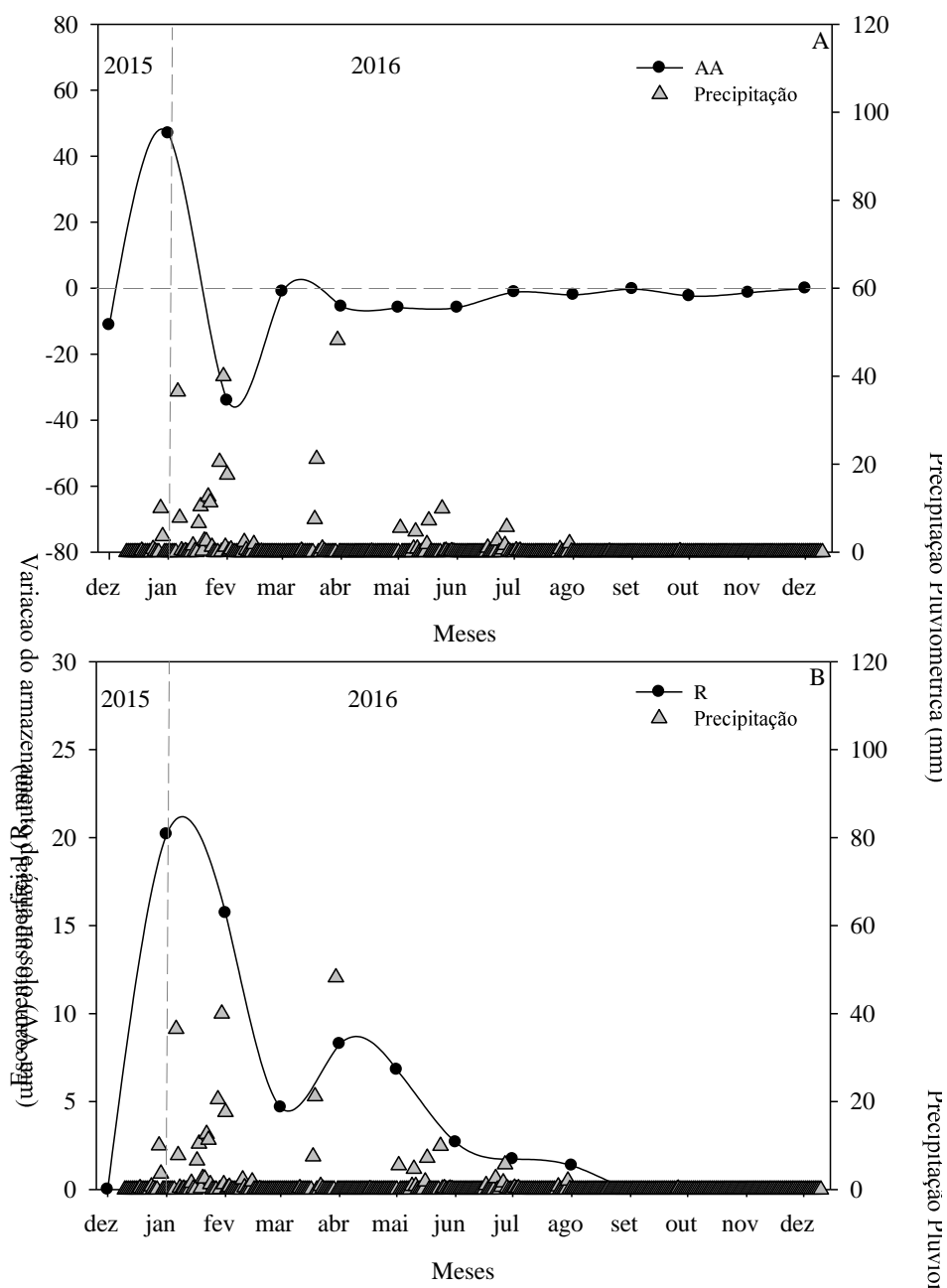


Figura 3 – Valores acumulados de variação do armazenamento de água no solo (ΔA) e escoamento superficial (R), além da precipitação pluviométrica diária (P) em uma área cultivada com a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], durante o período de 10 de dezembro de 2015 a 10 de dezembro de 2016, no município de Floresta, Pernambuco, Semiárido brasileiro.

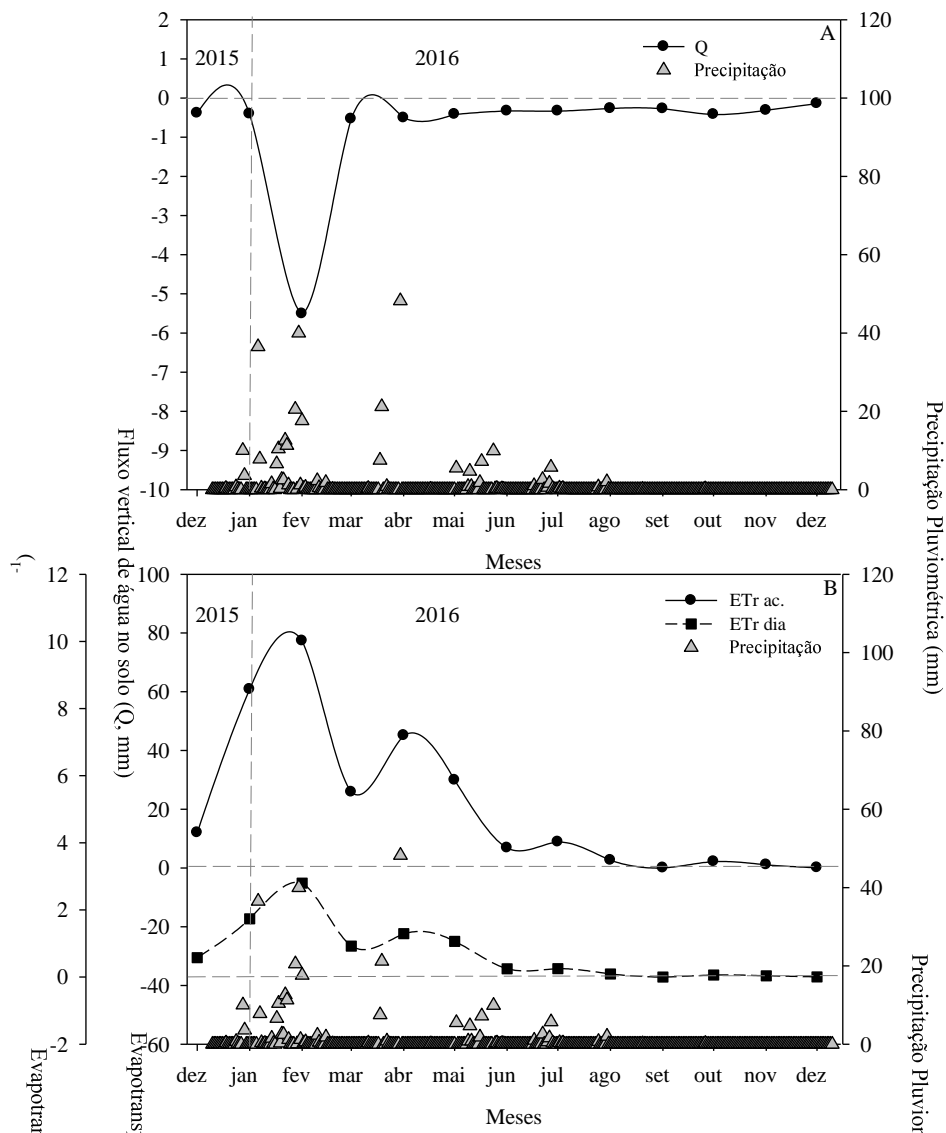


Figura 4 – Valores acumulados de evapotranspiração real acumulada (ETr ac.) e evapotranspiração real média diária (ETr dia.), além da precipitação pluviométrica diária (P) em uma área cultivada com a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], durante o período de 10 de dezembro de 2015 a 10 de dezembro de 2016, no município de Floresta, Pernambuco, Semiárido brasileiro.

O escoamento superficial (R), por sua vez, seguiu também o comportamento do regime pluviométrico local, exibindo altos valores nos meses de janeiro (20,2 mm) e fevereiro (15,7 mm) de 2016. Nos demais meses quando foram constatados esses eventos, março a agosto, os valores foram menos expressivos, apresentando média de apenas de 4,2 mm/mês. No total, esse componente equivaleu a 19,2% da precipitação pluviométrica que ocorreu na época (Figura 3B).

Nas determinações feitas do R pelo método de curva para a cultura da palma forrageira, Silva et al. (2015) e Pereira et al. (2017) constataram que este componente representou somente 1% da precipitação nos períodos de avaliação. Esse valor percentual é inferior ao que foi encontrado no presente estudo, que fez o uso de calhas de escoamento em sua determinação. Entretanto, tal resultado é relativo, pois se trata de um componente extremamente dependente das características de solo (tipo, estrutura, declividade, infiltração), das particularidades do plantio (sistema de cultivo, uso de cobertura) e da intensidade das chuvas (SILVA et al., 2012), chegando muitas vezes a ser desprezado (CASTELLANOS et al., 2013; SOUZA et al., 2013; QUEIROZ et al., 2015).

Nas condições meteorológicas em que a palma forrageira foi exposta (Figura 1), o fluxo vertical de água no solo (Q) só apresentou comportamento descendente, principalmente no mês de fevereiro (Figura 4A), por causa do alto conteúdo de água no solo (Figura 2). Esse resultado foi proporcionado pelos elevados níveis pluviométricos no final do mês de janeiro e no início de fevereiro de 2016. Entretanto, o Q seguiu o comportamento das chuvas nos demais meses, não tendo grandes variações (Figura 4A).

Apesar do grande volume de chuva no início de 2016, os valores de drenagem se mantiveram baixos (Figura 4A). Esse comportamento foi semelhante ao relatado por Silva et al. (2015) e Pereira et al. (2017), o qual está associado ao fato de que, depois de uma época com baixos níveis de precipitação, a maior quantidade de água que entra no sistema fica retida no armazenamento do solo (Figura 3A) ou é consumida rapidamente pela cultura (ARAUJO PRIMO et al., 2015). Assim, embora o gênero *Opuntia* desenvolva raízes mais superficiais (raízes de chuva) nas primeiras chuvas, estas morrem após o nível de água no solo diminuir (DUBROVSKY et al., 1998).

Já para o componente evapotranspiração, foi observado o comportamento da evapotranspiração real em termos de valores acumulados (ET_r ac.) e diários (ET_r dia.), que apresentaram os seus maiores valores nos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2016. Esses meses coincidem com os maiores níveis de precipitação, especialmente no

mês de fevereiro (Figura 3D), que apresenta, aproximadamente, evapotranspiração real acumulada de 272,4 mm, com média de 0,74 mm dia⁻¹(Figura 3D).

Os valores de ETr encontrados nesse estudo estão muito abaixo dos constatados na literatura. Pereira et al. (2017), em pesquisa com três cultivares de palma forrageira, entre elas a cultivar Orelha de Elefante Mexicana, encontraram uma média de 1,5 mm dia⁻¹, com evapotranspiração acumulada de 377 mm. Entretanto, as cultivares receberam em média 438,3 mm, valor 27,1% maior do que a precipitação que ocorreu durante o presente período experimental (319,4 mm) (Figura 1).

A baixa taxa de evapotranspiração na palma forrageira é tratada como estratégia de sobrevivência, a qual pode aumentar a capacidade dos seus cladódios em armazenar água e, assim, estabilizar a produção em períodos de menores níveis de disponibilidade hídrica (SILVA et al., 2014).

O metabolismo MAC (Metabolismo ácido da crassuláceas) dessa planta faz com ela abra os seus estômatos no horário noturno, que possui temperaturas menores do que o período diurno. Esse é um fator primordial para a conservação de água, ao contrário das plantas C3 e C4 que executam a abertura durante o horário diurno (NOBEL, 2001). Entretanto, em situação de boa disponibilidade hídrica para as plantas MAC, estas podem abrir seus estômatos para absorvem CO₂ durante a manhã e no final da tarde, enquanto que as plantas C3 e C4 não absorvem durante a noite (BLACK; OSMOND, 2003; WINTER et al., 2008). Dessa forma, esse comportamento aumenta a perda para atmosfera e, conseqüentemente, a sua evapotranspiração, explicando a maior taxa de ETr no mês de fevereiro de 2016 e os baixos índices no resto do período experimental (Figura 3D).

Em situação de maior disponibilidade hídrica, Silva et al. (2015) observaram que durante dois anos de experimento na cidade de Serra Talhada, PE, região semiárida do nordeste brasileiro, a evapotranspiração acumulada para a palma forrageira foi de 1.173 mm, com média diária de 2,4 mm dia⁻¹, porém a precipitação local foi elevada (1.269 mm). Esse valor é próximo ao encontrado por Consoli et al. (2013), na região do Mediterrâneo da Sicília, Itália, para a *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.), chegando a 2,5 mm dia⁻¹, tendo a cultura recebido 1.329 mm. Para a compreensão do comportamento da evapotranspiração da cultura ao ambiente em que foi exposta, observou-se que a razão ETr/ETo também seguiu o regime pluviométrico local, exibindo valores entre 0 a 0,62 (Figura 5).

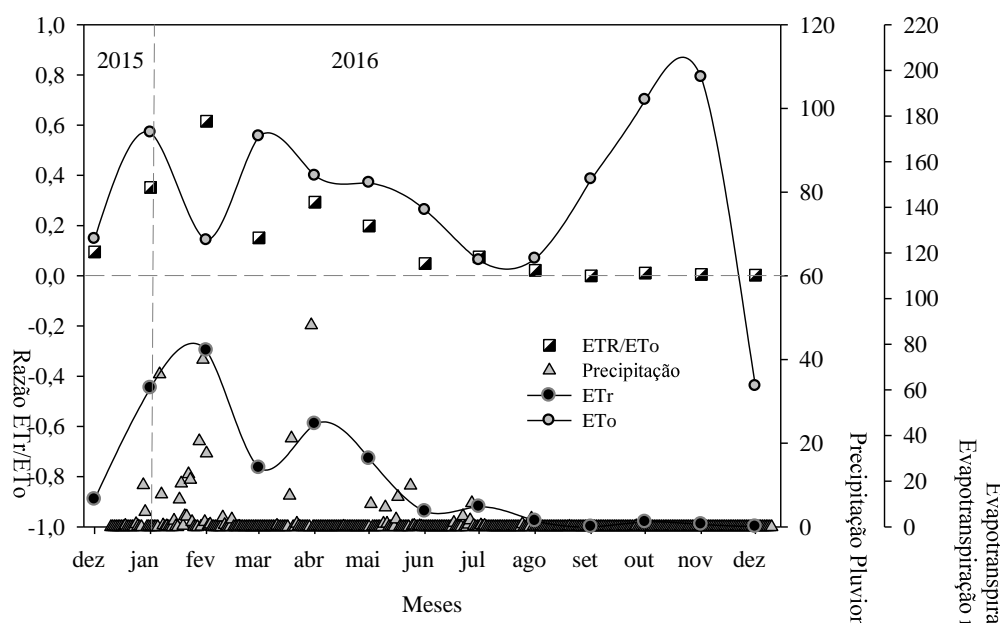


Figura 5 – Razão entre a evapotranspiração real (ETr) e a de referência (ETo) em uma área cultivada com a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], durante o período de 10 de dezembro de 2015 a 10 de dezembro de 2016, no município de Floresta, Pernambuco, Semiárido brasileiro.

O mês de fevereiro foi o que apresentou o maior valor (0,62), seguido por janeiro (0,35), os quais possuíam os maiores níveis pluviométricos, maiores taxas de ETr e baixa demanda atmosférica, o que proporcionou elevação dessa relação (ETr/ETo). No entanto, a partir de agosto até o término do período experimental, essa razão teve o seu pior desempenho, ficando próxima ou igual a zero (Figura 5). Esse resultado pode ser explicado porque foi uma época de baixa disponibilidade hídrica e alta demanda atmosférica, provocando pouca interação da cultura com o ambiente, devido ao fechamento dos seus estômatos para conservação da água existente em sua estrutura.

Em situações de baixa disponibilidade hídrica, como é o caso do presente estudo, a razão ETr/ETo explica o desempenho da evapotranspiração da cultura ao ambiente a que foi exposta (SILVA et al., 2015). Os resultados encontrados no presente estudo ficaram abaixo dos valores médios relatados por Silva et al. (2015), de 0,47, e Pereira et al. (2017), de 0,29; ambos para a região semiárida do Nordeste brasileiro, porém com níveis mais elevados de água disponível para a cultura. Consoli et al. (2013)

também destacaram a interação maior entre a palma forrageira e o ambiente, tendo na ocasião obtido uma relação de 0,40.

A condutância estomática desta espécie é influenciada pela diminuição do conteúdo de água no solo ao longo do tempo, atrasando a abertura dos estômatos no período noturno. Dessa forma, ocorre diminuição da condutância máxima do vapor d'água durante a noite (ACEVEDO et al., 1983), provocando a redução dessa razão (E_{Tr}/E_{To}).

Em situações de boa disponibilidade hídrica, a razão E_{Tr}/E_{To} é utilizada para a obtenção do coeficiente de cultura (K_c) em condições de plantio, refletindo o sistema de cultivo, demanda atmosférica do local e os aspectos morfofisiológicos da cultura (ALLEN et al., 1998).

Santana et al. (2013), trabalhando com a cultura do abacaxi (metabolismo MAC) em situações de boa disponibilidade de água, em Uberaba, MG, constataram condições médias de evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) de 3,01 e 3,45 mm dia⁻¹, com valores médios de 0,62 e 0,71 para a razão E_{Tr}/E_{To} , utilizando tubulação enterrada e superficial, respectivamente. Azevedo et al. (2007), na Paraíba, em condição de E_{Tc} igual a 4,6 mm dia⁻¹ para o abacaxi, observaram um valor maior dessa interação, chegando a 0,88. Esses estudos comprovam que as culturas interagem de formas diferentes às variadas condições de disponibilidade hídrica e ao ambiente de exposição.

Mecanismos de controle da evapotranspiração

Por meio da aplicação do método de Perez et al. (1999), que avaliou a consistência física dos dados micrometeorológicos, foram considerados como fisicamente consistentes 162 dias para todo o período de análise, que ficaram denominados de “dias válidos”.

A análise dos mecanismos de controle da evapotranspiração foi então realizada nesses “dias válidos”, tanto diariamente em cada um dos quatro períodos (“seco”, “chuvoso”, “seco-chuvoso” e “chuvoso-seco”) (Figura 6), quanto para os valores médios do horário diurno em cada período. Esses resultados foram denominados de “dias médios” (Figura 7), em que se considerou nessa avaliação somente o horário de 8 às 16 horas, por ser um intervalo de tempo em que a energia disponível era positiva ($R_n - G > 0$) e com menor quantidade de dados que apresentaram inconsistência física.

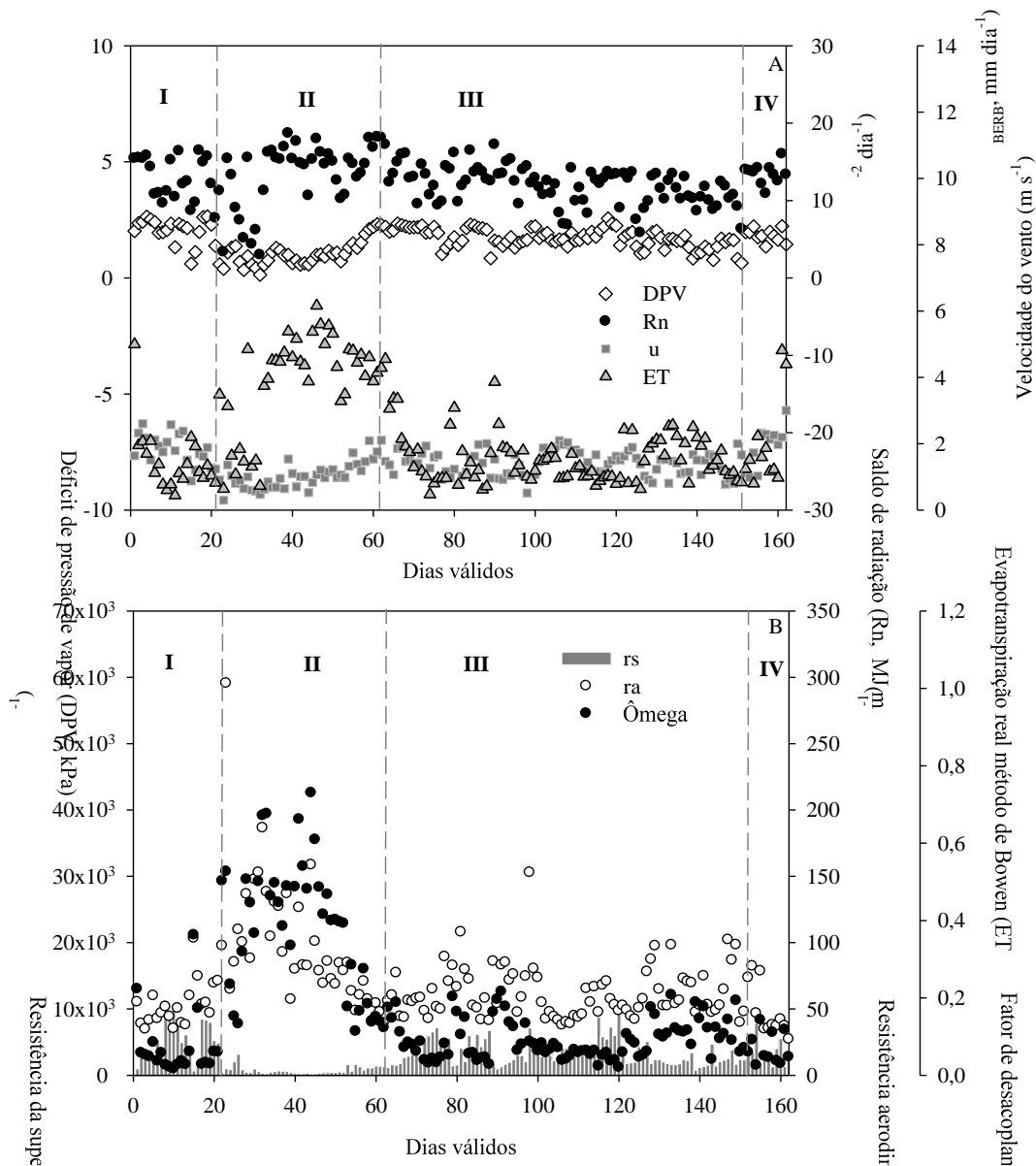


Figura 6 – Comportamento médio diário do déficit de pressão de vapor de d'água (DPV), saldo de radiação (Rn), evapotranspiração real da cultura pelo método da razão de Bowen (ET_{BERB}), velocidade do vento (u), resistência da superfície (r_s), resistência aerodinâmica (r_a) e o fator de desacoplamento (Ω ; Ômega) na cultura da palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], em diferentes condições de disponibilidade hídrica (I, seco-chuvoso; II, chuvoso; III, chuvoso-seco; IV, seco) nos dias considerados como válidos pelo método de Perez et al., (1999), durante o período de 10/12/2015 a 10/12/2016, no município de Floresta, Pernambuco, Semiárido brasileiro.

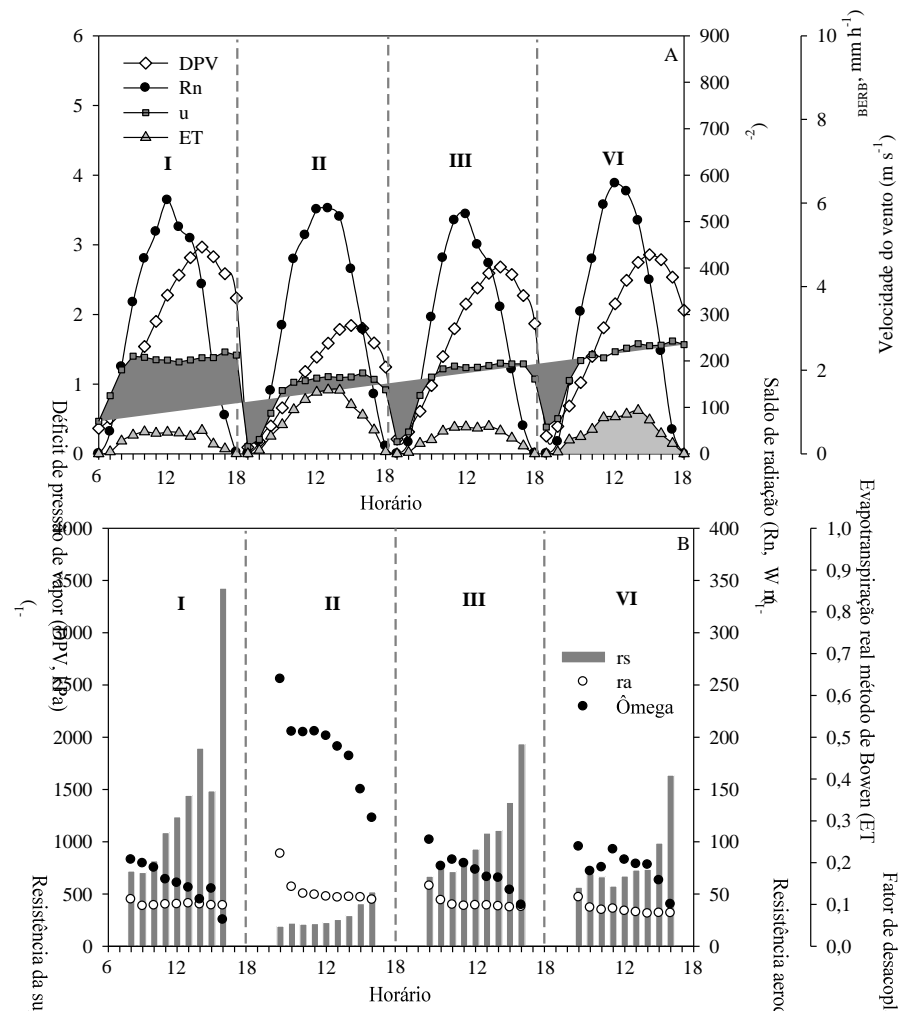


Figura 7 – Comportamento médio horário no período diurno do déficit de pressão de vapor d’água (DPV), saldo de radiação (Rn), evapotranspiração real da cultura pelo método da razão de Bowen (ET_{BERB}), velocidade do vento (u), resistência da superfície (r_s), resistência aerodinâmica (r_a) e o fator de desacoplamento (Ω ; Ômega) na cultura da palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], nos dias pertencentes às diferentes épocas de disponibilidade hídrica (I, seco-chuvoso; II, chuvoso; III, chuvoso-seco; IV, seco), considerados como válidos pelo método de Perez et al. (1999), durante o período de 10/12/2015 a 10/12/2016, no município de Floresta, Pernambuco, Semiárido brasileiro.

Observam-se nas Figuras 6A e 7A, que o comportamento do déficit de pressão de vapor d’água (DPV) foi bem definido, conforme condições atmosféricas reinantes em cada período, apresentando média diária de 1,59 kPa, com destaque para a época chuvosa (período II) que exibiu o menor valor dessa variável (1,05 kPa) (Tabela 2).

Tabela 2 – Média dos valores diários e dos horários do período diurno (8 às 16 horas), referentes ao déficit de pressão de vapor de água (DPV), saldo de radiação (Rn), evapotranspiração real da cultura pelo método de Bowen (ET_{BERB}), velocidade do vento (u), resistência da superfície (r_s), resistência aerodinâmica (r_a) e do fator de desacoplamento (Ω ; Ômega) na cultura da palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], nos dias considerados com válidos pelo método de Perez et al. (1999), pertencentes a diferentes períodos de disponibilidade hídrica (I, seco-chuvoso; II, chuvoso; III, chuvoso-seco; IV, seco) durante a época de 10/12/2015 a 10/12/2016, no município de Floresta, Pernambuco, Semiárido brasileiro

Variáveis (valores diários)	Períodos			
	I ("seco-chuvoso")	II ("chuvoso")	III ("chuvoso- seco")	IV ("seco")
DPV (kPa)	1,97	1,05	1,71	1,83
Rn (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	12,91	13,38	11,96	13,46
u (m s ⁻¹)	1,83	1,05	1,40	1,91
ET (mm dia ⁻¹)	1,47	3,89	1,57	1,98
r_s (s m ⁻¹)	5302	788	3437	3525
r_a (s m ⁻¹)	52,89	97,21	61,79	48,38
Ω	0,07	0,39	0,09	0,07

Variáveis (valores do horário diurna)	Períodos			
	I ("seco-chuvoso")	II ("chuvoso")	III ("chuvoso- seco")	IV ("seco")
DPV (kPa)	1,89	1,13	1,68	1,78
Rn (W m ⁻²)	275,94	284,85	255,51	287,53
u (m s ⁻¹)	2,09	1,46	1,74	2,17
ET (mm h ⁻¹)	0,32	0,83	0,37	0,51
r_s (s m ⁻¹)	1425,2	283,5	1045,2	807,5
r_a (s m ⁻¹)	40,03	52,85	41,12	34,88
Ω	0,15	0,47	0,17	0,18

Em termos de comportamento médio diário e dos horários do período diurno, o DPV apresentou-se mais elevado para nas épocas consideradas menos chuvosas (I, III e IV), com menor expressividade no período II (Tabela 2). Especificamente em termos dos horários do período diurno, ele eleva-se nas primeiras horas do dia, apresentando o seu pico máximo à tarde, quando decresce em sequência (Figura 7B), devido à atmosfera se encontrar mais seca nesses períodos, depois do horário de pico (SOUZA FILHO et al., 2005).

Verificou-se ainda a existência de uma relação positiva entre a resistência da superfície (r_s) e o DPV, ou seja, conforme o DPV aumenta, a r_s também eleva-se (Figuras 6 e 7). Já a r_s não sofreu muita influência do saldo de radiação (Rn), pois os seus valores não tiveram grande discrepância (Tabela 2).

Em termos gerais, os valores de r_s apresentaram-se elevados nas épocas de menores níveis pluviométricos (períodos I, III e IV) (Figura 6B e 7B), com picos

máximos no final da tarde, e comportamento quase que crescente para os horários diurnos desses períodos, havendo, porém, pouca variação ao longo do dia no período II (“chuvoso”) (Figura 7B).

Fraga et al. (2015) observaram em uma área de Cambará (*Vockysia Divergens* Pohl), no Estado do Mato Grosso, um comportamento diário contrário ao encontrado no presente estudo. Os autores relataram altos níveis de r_s por volta das 12 horas, tanto no período úmido como no seco dessa região, apresentando a r_s uma conduta crescente e decrescente antes e depois desse horário, respectivamente. Esse comportamento de aumento da r_s nas primeiras horas do dia está de acordo com a indução da abertura dos estômatos provocada pela radiação solar, assim como a sua diminuição no final da tarde. No entanto, além da radiação solar, outras variáveis meteorológicas afetam a r_s , como temperatura do ar e o DPV (ALVES; PEREIRA, 2000).

Silva et al. (2012), por sua vez, observaram para cana-de-açúcar irrigada no município de Juazeiro, Bahia, que a cultura apresentou picos elevados de r_s no final da tarde, semelhante ao do presente estudo, porém isso também acontecia no começo da manhã.

Os valores menores de r_s ocorrem nas primeiras horas da manhã e os maiores nas últimas horas da tarde para cultura da palma forrageira (Figura 7B), e podem estar associados ao fechamento e abertura estomática, respectivamente, característicos das espécies MAC. Plantas desse grupo são eficientes em diminuir a perda de água por transpiração, sendo que a abertura estomática, na maioria das vezes, ocorre somente à noite, que é o período de menor demanda atmosférica, estando os estômatos fechados durante a maior parte do dia (BLACK; OSMOND, 2003).

Já para o desempenho diário de r_s (Figura 6B) e dos horários diurnos (Figura 7B) no período II, a maior presença de água no sistema nessa época conduziu a palma forrageira a permanecer mais “desacoplada com a atmosfera”, pois os valores de r_s foram menores, aliados a um aumento significativo da resistência aerodinâmica (r_a). Esse resultado é semelhante ao relatado por Souza et al. (2015), em uma área de Caatinga no município de Petrolina, PE, que depois dos eventos de precipitação, a vegetação mostrou-se desacoplada da atmosfera ($\Omega = 1$), apresentando r_s praticamente nulo e r_a alto.

Por sua vez, os valores da r_a apresentaram comportamento mais elevado no período II (chuvoso) e menos expressivo no período IV (seco), com conduta semelhante para todas as épocas (Tabela 2). Apesar dos valores de velocidade média do vento terem

sido mais intensos nas épocas de menor disponibilidade hídrica (Tabela 2), o que poderia favorecer à diminuição de r_a (SOUZA FILHO et al., 2005; PINTO JÚNIOR et al., 2009), não ocorreu aumento da transpiração das plantas. Assim, não foi constatado isso no presente estudo, com menores valores deste componente nos períodos de menor disponibilidade hídrica, mas menores taxas de transpiração (Figuras 6 e 7).

Em termos horários, os maiores valores de r_a estão no início da manhã (8 horas) (Figura 7B), em que os períodos II e III expressaram as maiores taxas, com 88,3 e 57,66 $s\ m^{-1}$, respectivamente (Tabela 2). Além de serem as épocas dos mais elevados níveis de precipitação, proporcionando maior transpiração das plantas e, assim, elevada quantidade de vapor d'água acima do dossel da cultura, houve um aumento progressivo da velocidade do vento nesse horário, fazendo com que também aumentassem os valores de r_a (Figura 7).

A elevação da transpiração dessa cultura se deve, especificamente, ao maior tempo em que os seus estômatos permanecem abertos sob situações de boa disponibilidade hídrica, pois plantas MAC, nessas condições, potencializam a absorção de CO_2 durante a noite e o dia (início da manhã e final da tarde) (NOBEL, 2001; WINTER et al., 2008).

De forma mais discreta, há também maior expressividade do r_a para as 8 horas da manhã nos períodos I (44,62 $s\ m^{-1}$) e IV (46,67 $s\ m^{-1}$) (Figura 7B). Acevedo et al. (1983) relataram que mesmo com o aumento dos dias de seca ao longo do tempo, a abertura estomática é atrasada no início do horário noturno. Assim, a condutância máxima do vapor d'água é reduzida durante a noite, porém, a abertura dos estômatos é observada ao amanhecer. No entanto, a condutância máxima de vapor d'água, neste momento, não sofre muito a influência por esse estresse.

Finalmente, para melhor compreensão da contribuição dos diferentes elementos na evapotranspiração da palma forrageira, foi determinado o fator de desacoplamento (Figuras 6B e 7B), indicando que, no período II (“chuvoso”), a palma forrageira esteve mais “desacoplada com a atmosfera”, quando sua evapotranspiração era mais sensível ao saldo de radiação solar presente na área (Tabela 2).

Tal fato pode ser explicado pela maior quantidade de água no sistema, fazendo com que essa planta tivesse um comportamento facultativo, executando mais trocas gasosas durante o dia e, assim, permanecendo maior tempo com os estômatos abertos (WINTER et al., 2008). Além disso, houve menor disponibilidade de energia no período chuvoso devido a maior nebulosidade da época, tornando as plantas mais dependentes

do saldo de radiação no processo de transferência de vapor d'água para a atmosfera (SOUZA FILHO et al., 2005).

Para os demais períodos, os valores de Ω estiveram mais próximos de zero (Tabela 2), sugerindo que a cultura está “acoplada com a atmosfera” e a evapotranspiração tem um maior controle exercido pelas condições atmosféricas presentes, associado especificamente ao controle estomático dessa planta. Nesses períodos, as condições pluviométricas eram mais restritas, provocando o fechamento dos estômatos durante um tempo maior para diminuição da perda de água por transpiração, além de níveis mais elevados de velocidade do vento (Tabela 2), que podem induzir ao fechamento dos mesmos (EL-SHARKAWY, 1990)

Quanto ao seu comportamento horário, os picos de valores se mantiveram sempre na primeira hora da manhã, chegando a 0,21; 0,64; 0,25 e 0,24 nos períodos I, II, III e IV, respectivamente. Esses resultados demonstram que, entre as épocas, o período II, neste horário, foi o que estava mais “desacoplado com a atmosfera”. Em sequência a esse intervalo de tempo, o valor de Ω diminuiu, tendo um comportamento quase que totalmente decrescente. Nesse caso, constata-se uma condição de “acoplamento com a atmosfera” local (Figura 7B).

Conclusões

- A precipitação pluviométrica foi o componente mais significativo do balanço de água no solo na avaliação do processo de transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera, a qual influenciou na dinâmica dos demais componentes que exibiram baixa expressividade ao longo do tempo;
- Os altos valores do fator de desacoplamento estão relacionados à diminuição da resistência da superfície e aumento da resistência aerodinâmica. Os menores valores desse fator foram obtidos quando a resistência imposta pela superfície influenciou mais fortemente na evapotranspiração da palma forrageira ao longo do período de análise;
- O metabolismo fotossintético da palma forrageira interage rapidamente com o ambiente, fechando os seus estômatos para não haver grande perda de água em sua estrutura, o que faz com que ela permaneça por mais tempo “desacoplada com a atmosfera”. Esse fato está vinculado aos baixos níveis de precipitação da região;

- Em condições de maior disponibilidade hídrica, a cultura apresentou menor rigidez dos seus estômatos, aumentando a sua taxa de transpiração e ficando mais tempo “acoplada com a atmosfera”.

Referências Bibliográficas

- ACEVEDO, E.; BADILLA, I.; NOBEL, P.S. Water relations, diurnal acidity changes, and productivity of a cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. **Plant Physiology**, v.72, p.775-780, 1983.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMUTH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome, Itália: FAO, 1998. 301p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALVES, I.; PEREIRA, L.S. Modelling surface resistance from climatic variables? **Agricultural Water Management**, v. 42, p. 371-385, 2000.
- ANDRADE, A.P.; COSTA, R.G.; SANTOS, E.M.; SILVA, D.S. Produção animal no semiárido: o desafio de disponibilizar forragem, em quantidade e com qualidade, na estação seca. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v.4, n.4, p. 1-14, 2010.
- ARAÚJO PRIMO, J.T.; SILVA, T.G.F.; SIQUEIRA E SILVA, S.M.; MOURA, M.S.B.; SOUZA, L.S.B. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. **Revista Ceres**, v.62, p.20-29, 2015.
- AZEVEDO, P.V.; SOUZA, C.B.; SILVA, B.B.; SILVA, V.P.R. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment, Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 88, p. 201-208, 2007.
- BLACK, C.C.; OSMOND, C.B. Crassulacean acid metabolism photosynthesis: ‘working the night shift’. **Photosynthesis Research**, v.76, p.329-341, 2003.
- CASTELLANOS, M.T.; CARTAGENA, M.C.; RIBAS, F.; CABELLO, M.J.; ARCE, A.; TARQUIS, A.M. Impact of nitrogen uptake on field water balance in fertirrigated melon. **Agricultural Water Management**, v.120, p.56-63, 2013.
- CONSOLI, S.; INGLESE, G.; INGLESE, P. Determination of evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) orchard in a Semi-arid Environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, p.680-690, 2013.
- DICKEN, U.; COHEN, S.; TANNY, J. Examination of the Bowen ratio energy balance technique for evapotranspiration estimates in screenhouses. **Biosystems Engineering**, v.114, p.397-405, 2013.
- DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SANTOS, M.V.F.; LIRA, M.A.; SANTOS, D.C.; FARIAS, I.; LIMA, L.E.; FERREIRA, R.L.C. Productivity of *Opuntia ficus indica* (L.) Miller under different N and P fertilization and plant population in northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.67, p.357-372, 2006.

DUBROVSKY, J.G.; NORTH, G.B.; NOBEL, P.S. Root growth, developmental changes in the apex, and hydraulic conductivity for *Opuntia ficus-indica* during drought. **New Phytology**, v.138, p.75-82, 1998.

EL-SHARKAWY, M.A. Effect of humidity and wind on leaf conductance of field grown cassava. **Revista Brasileira Fisiologia Vegetal**, v.2, p.17-22, 1990.

FRAGA, C.I.M.; SANCHES, L.; PINTO JUNIOR, O.B.; CURADO, L.F.A.; GAIO, D.C. Condutância do dossel, condutância aerodinâmica e fator de desacoplamento em floresta de *Vochysia Divergens* Pohl (Vochysiaceae) no Pantanal brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 3, p. 275-284, 2015.

GONDIM, P.S.S.; LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; HAMMECKER, C.; SILVA, R.A.B.; GOMES, C.A. Environmental control on water vapour and energy exchanges over grasslands in semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.3-8, 2015.

HERNÁNDEZ, A.F.; CASTILLO, I.O.; AMADOR, B.M.; HERNANDEZ, J.L.G. Enrique Troyo-Dieguez yield and physiological traits of prickly pear cactus nopal (*Opuntia* spp.) cultivars under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v.70, p. 97-107, 2004.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. **Normais climatológicas do Brasil 1960-1991**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

JACOBS, J.M.; MERGELSBERG, S.L.; LOPERA, A.F.; MYERS, D.A. Evapotranspiration from a wet prairie wetland under drought conditions: Paynes Prairie Preserve, Florida, USA. **Wetlands**, v. 22, n. 2, p. 374-385, 2002.

JIAN, S.; ZHAO, C.; FANG, S.; YU, K. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 206, p. 85-96, 2015.

LEWIS, D.A.; NOBEL, P.S. Thermal energy exchange model and water loss of a barrel cactus, *Ferocactus acanthodes*. **Plant Physiol.**, v.60, p.609-616, 1997.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, SP: EDUSP, 2005. 335p.

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.

MATSUMOTO, K.; OHTA, T.; NAKAI, T.; KUWADA, T.; DAIKOKU, K.; IIDA, S.; YABUKI, H.; KONONOV, A.V.; VAN DER MOLEN, M.K.; KODAMA, Y.; MAXIMOV, T.C.; DOLMAN, A.J.; HATTORI, S. Responses of surface conductance to forest environments in the Far East. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 1926-1940, 2008.

- McNAUGHTON, K.G.; JARVIS, P.G. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York, NY: Academic Press, 1983. v. 7, p. 1-47.
- MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**. 2.ed. London: Edward Arnold, 1990. 291p.
- NICOLÁS, E.; BARRADAS, V.L.; ORTUÑO, M.F.; NAVARRO, A.; TORRECILLAS, A.; ALARCÓN, J.J. Environmental and stomatal control of transpiration, canopy conductance and decoupling coefficient in young lemon trees under shading net. **Environmental and Experimental Botany**, v.63, p.200-206, 2008.
- NOBEL, P.S. Biologia ambiental. In: BARBERA, G.; INGLESE, P. **Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira**. João Pessoa, PB: SEBRAE-PB, 2001. 300 p.
- OLIVEIRA, G.M.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; ALMEIDA, A.C. Determinação da evapotranspiração e dos coeficientes de cultura para as diferentes fases de desenvolvimento do melão (*Cucumis melo l.*) na região norte da Bahia. **Revista Verde**, Mossoró, v.5, n.2, p. 142-151, 2010.
- PEREIRA, P.C.; SILVA, T.G.F.; ZOLNIER, S.; SIQUEIRA E SILVA, S.M.; SILVA, M.J. Water balance in soil cultivated with forage cactus clones under irrigation. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 3, p. 776-785, 2017.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.
- PINTO JÚNIOR, O.B.; LOBO, F.A.; SANCHES, L.; VOURLITIS, G.L.; NOGUEIRA, J.S. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta de transição Amazônia Cerrado. **Ciência e Natura**, v. 31, n.2, p. 95-106, 2009.
- QUEIROZ, M.G.; SILVA, T.G.F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S.M.S.; LIMA, L.R.; ALVES, J.O. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 931-938, 2015.
- RIGHI, E.Z.; ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R. Energy balance of a young drip-irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.15, p.367-379, 2007.
- SANTANA, M.J.; SOUZA, O.P.; CAMARGOS, A.E.V.; ANDRADE, J.P.R. Coeficientes de cultura do abacaxizeiro nas condições edafoclimáticas de Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.6, p.602-607, 2013.
- SHUTTLEWORTH, W.J. Evaporation from Amazonian rainforest. **Proc. R. Soc. London**, v. b233, p.321-346, 1988.

SILVA, T.G.F.; ARAÚJO PRIMO, J.T.; MOURA, M.S.B.; SIQUEIRA E SILVA, S.M.; MORAIS, J.E.F.; PEREIRA, P.C.; SOUZA, C.A.A. Soil water dynamics and evapotranspiration of forage cactus clones under rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 7, p. 515-525, 2015.

SILVA, T.G.F.; PRIMO, J.T.A.; SILVA, S.M.S.; MOURA, M.S.B.; SANTOS, D.C.; SILVA, M.C.; ARAÚJO, J.E.M. Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. **Bragantia**, v.73, p. 184-191, 2014.

SILVA, T.G.F.; ZOLNIER, S.; MOURA, M.S.B.; CARMO, J.F.A.; RIBEIRO, A. Fator de desacoplamento em um canal irrigado no submédio do Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p. 849-858, 2012.

SOUZA FILHO, J.D.C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; COHEN, J.C.P. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, p. 223-229, 2005.

SOUZA, C.; ANDRADE, A.P.; LIMA, J.R.S.; ANTONINO A.C.D.; SOUZA, E.S.; SILVA, I.F. Balanço hídrico da cultura da mamona sob condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.1, p.3-10, 2013.

SOUZA, L.S.B.; MOURA, M.S.B.; SEDIYAMA, G.C.; SILVA, T.G.F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.8, p.627-636, 2015.

TEGEGNE, F.; KIJORA, C.; PETERS, K.J. Study on the optimal level of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) supplementation to sheep and its contribution as source of water. **Small Ruminant Research**, v.72, p.157-164, 2007.

WINTER, K.; GARCIA, M.; HOLTUM, J.A.M. On the nature of facultative and constitutive CAM: environmental and developmental control of CAM expression during early growth of *Clusia*, *Kalanchoe*, and *Opuntia*. **Journal of Experimental Botany**, v.59, n.7, p.1829-1840, 2008.