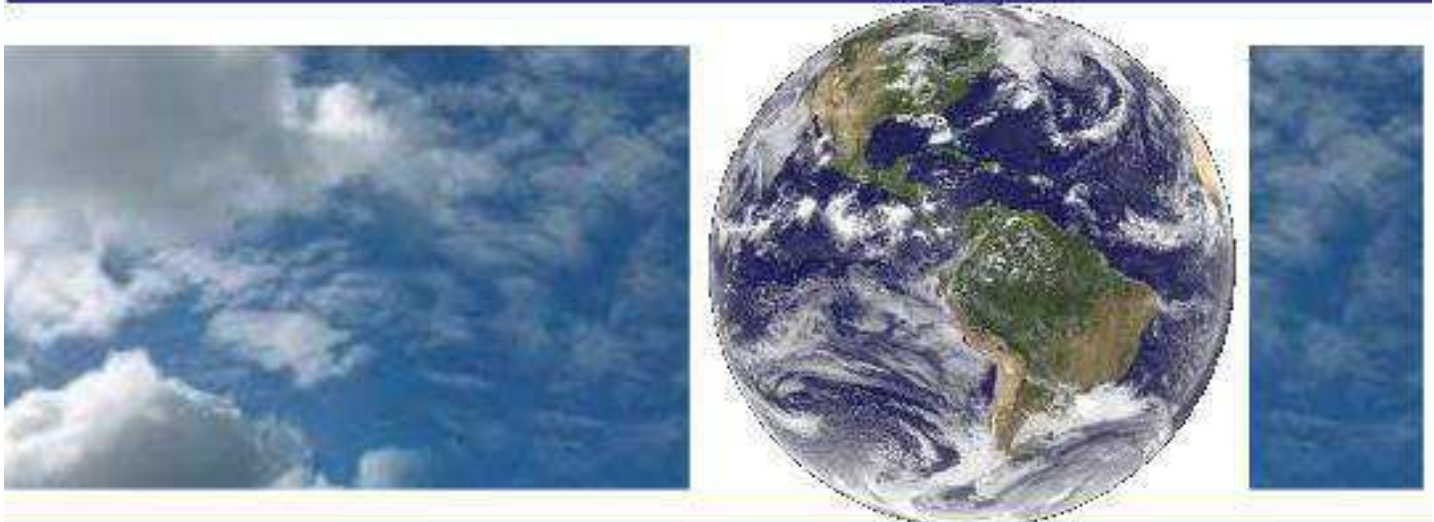


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



**Tese de Doutorado**

**VALÉRIA PEIXOTO BORGES**

**NECESSIDADES HÍDRICAS E PRODUTIVIDADE DE ÁGUA  
DA CULTURA DO MELOEIRO IRRIGADO  
NA REGIÃO DE MOSSORÓ - RN**

**Campina Grande, Dezembro de 2011**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**



**TESE DE DOUTORADO**

**NECESSIDADES HÍDRICAS E PRODUTIVIDADE DE ÁGUA DA CULTURA DO  
MELOEIRO IRRIGADO NA REGIÃO DE MOSSORÓ - RN**

**Valéria Peixoto Borges**

**Campina Grande – PB**

**Dezembro de 2011**

Valéria Peixoto Borges

**NECESSIDADES HÍDRICAS E PRODUTIVIDADE DE ÁGUA DA CULTURA DO  
MELOEIRO IRRIGADO NA REGIÃO DE MOSSORÓ - RN**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Doutor em Meteorologia.

Área de Concentração: Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia

Subárea: Sensoriamento Remoto Aplicado

Orientador: Prof. PhD. Bernardo Barbosa da Silva

Campina Grande – PB

Dezembro de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B732n Borges, Valéria Peixoto.  
Necessidades hídricas e produtividade de água da cultura do meloeiro irrigado na região de Mossoró - RN / Valéria Peixoto Borges. – Campina Grande, 2011.  
138 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.  
Orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva.  
Referências.

1. Melão. 2. Evapotranspiração. 3. Razão de Bowen. 4. SEBAL. 5. Uso da Água. I. Título.

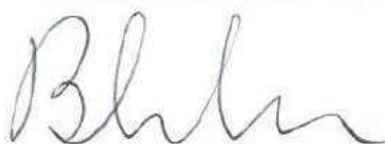
CDU 551.5:631(043)

VALERIA PEIXOTO BORGES

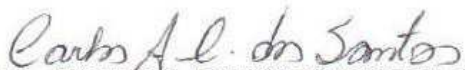
NECESSIDADES HÍDRICAS E PRODUTIVIDADE DE ÁGUA DA CULTURA DO  
MELOEIRO IRRIGADO NA REGIÃO DE MOSSORÓ-RN

TESE APROVADA EM 09/12/2011

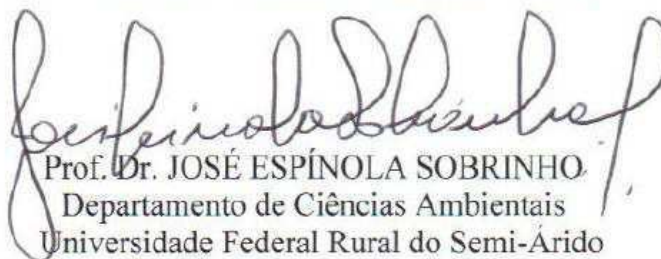
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ ESPÍNOLA SOBRINHO  
Departamento de Ciências Ambientais  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido



Prof. Dr. AUREO SILVA DE OLIVEIRA  
Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia



Prof. Dr. PAULO HENRIQUE CARAMORI  
Instituto Agrônômico do Paraná

*Comece fazendo o que é necessário,  
depois o que é possível  
e de repente você estará fazendo  
o impossível.*

*São Francisco de Assis*

## DEDICATÓRIAS

Aos meus pais, Nalva Peixoto Borges e Dilson Chaves Borges, por todo amor e pela oportunidade que me deram de viver e evoluir; à minha irmã, Viviane Peixoto Borges, que muito amo,  
Ofereço.

Ao Martinho Vieira Dantas Filho, por todo amor, traduzido em companhia, paciência, dedicação e estímulo, verdadeiros bálsamos em minha jornada,  
Dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Criador, pela Vida e aos Amigos Espirituais pela força e luz em todos os momentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, pela oportunidade de crescimento profissional.

Ao Professor Bernardo Barbosa da Silva pela orientação, conselhos e aprendizados advindos do convívio com sua sabedoria, força e vontade durante estes quatro últimos anos.

Ao Professor José Espínola Sobrinho, co-orientador, pelo apoio incondicional à pesquisa em todos os momentos, pela receptividade, confiança e amizade.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira, Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos e Dr. Paulo Henrique Caramori, pela valiosa contribuição doada, que muito enriqueceu a qualidade do trabalho final.

A Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Pesquisa pelas bolsas pelo auxílio financeiro concedido.

Aos Professores do Doutorado em Meteorologia da UFCG, em especial Dr. Enio Pereira de Souza, Dra Célia Campos Braga, Dr. Kamada Karuna Kumar e Dr. Tantravahi Venkata Ramana Rao.

Aos funcionários da UACA, principalmente Divanete Cruz Rocha Farias, pela competência e amizade.

Aos proprietários das fazendas Fruta Vida, Norfruit, Dinamarca e Brazil Melon, respectivamente os senhores João Manuel Lopez Lima, José Heliton Severo Almeida, Ajax Dantas de Góis Filho e Francisco Vieira da Costa, por



permitirem o acesso à suas propriedades, disponibilizarem os dados necessários à pesquisa e pela gentileza com a qual me receberam. Ao Sr. João Manuel Lopez Lima, especificamente pela permissão da montagem do experimento e apoio prestado na condução do mesmo.

Aos funcionários da administração das fazendas acima citadas, que muito me auxiliaram, facilitando a coleta dos dados, sempre gentis e prestativos: Gildene, Ricardo, Rossy, Arlene, Antônio Rivanildo, Marmut Abdala, Aline, Erli e todos demais que de alguma forma ajudaram.

Aos professores do Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas - DCAT da UFERSA, Francisco de Queiroz Porto Filho, Augusto Carlos Pavão, Paulo Cesar Moura da Silva, Marcelo Tavares Gurgel, Miguel Ferreira Neto e Maria Zuleide de Negreiros pela viabilização do uso da estrutura da universidade, em especial o Prof. José Francismar de Medeiros, também pela orientação nos trabalhos de campo e laboratório.

Aos funcionários do DCAT e do Setor de transporte da UFERSA.

A Dra. Alexsandra Duarte de Oliveira, que forneceu todo apoio e estímulo durante a fase experimental em Mossoró.

Ao amigo Rafael da Costa Ferreira, pela parceria, ajuda e companhia.

Ao Prof. Dr. José Ferreira da Costa Filho, que forneceu instrumentos para o trabalho em campo.

Aos colegas da Pós-Graduação, em especial os amigos Soetânea Oliveira, Walker Albuquerque, Carlos Herriot Júnior, Fabiane Dantas e Taciana Araújo e aos amigos do grupo de Agrometeorologia Alexandra Braga, Bergson Bezerra, Carlos Antonio dos santos, Francineide Amorim e Marcus Bezerra.

Aos amigos de Mossoró Vágna Pereira, Ramon, Vilauba Palácio, Cristiane Celedonio, Bruno Marçal, Edmilson Gomes, Murilo Barbosa, Joaquim Branco e Francisco Galberto dos Santos, sempre prestativos e companheiros.

A Ducinéia Mendes, todas as amigas do pensionato União, e Fabiana Rolim, que foram minha primeira família em Campina Grande.

A Giuliana Varella, minha amiga-irmã e toda família Juventude UFE.

Aos familiares, tios e primos, em especial Cida Peixoto, Clovis Peixoto, Zuleide Peixoto e Giselle Peixoto, sempre torcedores das minhas vitórias.

A meus sogros, D. Lúcia Vieira a Sr. Martinho Dantas e cunhadas, Naftali Vieira, Ednéia Vieira, Luciana Vieira e Raquel Vieira pela prazerosa convivência e todo apoio.

As amigas de sempre: Daianny Costa, Mariana Guerreiro, Patrícia Nascimento e Vanessa das Neves.

A todos que, em algum momento participaram da trajetória do meu doutorado, obrigada!

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1. O Meloeiro ( <i>Cucumis melo</i> L.).....	19
2.1.1. Exigências climáticas.....	19
2.1.2. Variedades cultivadas.....	20
2.1.3. Aspectos do cultivo do melão.....	21
2.1.4. Necessidades hídricas.....	23
2.2. Evapotranspiração das culturas.....	24
2.3. Balanço de Energia pela Razão de Bowen.....	28
2.4. Modelagem da evapotranspiração com sensoriamento remoto.....	34
2.5. Produtividade de água.....	37
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	40
3.1. Localização e caracterização da área de estudo.....	40

3.2. Experimento de campo.....	44
3.3. Balanço de energia pelo Método da razão de Bowen.....	48
3.4. Balanço de energia e evapotranspiração pelo SEBAL.....	51
3.4.1. Imagens de satélite.....	51
3.4.2. Balanço de radiação.....	52
3.4.3. Balanço de energia e evapotranspiração.....	58
3.4.3.1. Fluxo de calor no solo (G).....	58
3.4.3.2. Fluxo de calor sensível (H).....	58
3.4.3.3. Fluxo de calor latente (LE) e evapotranspiração.....	65
3.5. Produtividade e uso da água.....	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
4.1. Observações de campo.....	71
4.1.1. Condições meteorológicas registradas na área estudada.....	71
4.1.2. Desenvolvimento da cultura e Balanço de Energia pela Razão de Bowen.....	75
4.1.3. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo pelo método BERB	83
4.2. Análise dos produtos gerados pelo SEBAL.....	91
4.2.1. Balanço de radiação.....	91
4.2.2. Fluxos não radiativos e evapotranspiração.....	98
4.3. Produtividade e uso da água.....	106

5. CONCLUSÕES .....	119
6. SUGESTÕES.....	121
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Sistema de cultivo do meloeiro em Mossoró-RN. A - cobertura plástica utilizada sobre o solo (foto de 16 de agosto de 2009, parcela 81 da Fazenda Fruta Vida) e B - manta de polipropileno aplicada sobre a fileira de plantas (foto de 26 de novembro de 2009, parcela 35 da Fazenda Fruta Vida).....	22
<b>Figura 3.1.</b> Mapa do Rio Grande do Norte, destacando o município de Mossoró ao lado de recorte da área de interesse (imagem TM - Landsat 5 em composição RGB 4-3-2), com destaque para as propriedades avaliadas: 1: Dinamarca, 2: Brazil Melon, 3: Norfruit e 4: Fruta Vida.....	41
<b>Figura 3.2.</b> Mapa construído a partir de imagem do programa “Google Earth” no qual são destacadas as parcelas P81 e P35 da Fazenda Fruta Vida, Mossoró – RN. O local de instalação dos sensores é indicado com uma cruz.....	44
<b>Figura 3.3.</b> Foto da área do experimento para determinação do BERB, indicando a posição dos sensores. Fazenda Fruta Vida, parcela 81, 16 de setembro de 2009.....	49
<b>Figura 3.4.</b> Esquema da obtenção do balanço de radiação à superfície a partir de imagens de satélite.....	52
<b>Figura 3.5.</b> Processo iterativo para cômputo do fluxo de calor sensível no SEBAL. Adaptado de Allen et al. (2002).....	60

<b>Figura 4.1.</b> Déficit de pressão de vapor d'água ( $e_s - e_a$ ) e radiação solar global ( $R_g$ ) medidos na Estação Meteorológica do INMET em Mossoró durante o período de 20 de julho de 2009 a 12 de janeiro de 2010.....	73
<b>Figura 4.2.</b> Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e precipitação ( $P$ ) registrada na estação do INMET em Mossoró durante período de 20 de julho de 2009 a 12 de janeiro de 2010.....	74
<b>Figura 4.3.</b> Evolução do índice de área foliar (IAF) do meloeiro cultivado nas parcelas 81 e 35 da fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), na safra 2009/2010. DAS: dias após semeadura.....	75
<b>Figura 4.4.</b> Albedo da superfície registrado durante o ciclo do meloeiro cultivado nas parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), na safra 2009/2010. DAS: dias após semeadura.....	76
<b>Figura 4.5.</b> Temperatura da superfície do solo ( $T_s$ ) registrada durante o ciclo do meloeiro cultivado nas parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), na safra 2009/2010. DAS: dias após semeadura.....	78
<b>Figura 4.6.</b> Valores médios dos componentes do balanço de energia determinados pelo método BERB nas parcelas 81 e 35, distribuídos nos estádios fenológicos do meloeiro: A e B, estágio inicial; C e D, estágio de crescimento vegetativo; E e F, estágio de frutificação; G e H, dados do dia da colheita.....	79

<b>Figura 4.7.</b> Evapotranspiração do meloeiro cultivado com <i>mulch</i> plástico, obtida com o Balanço de Energia pela Razão de Bowen ( $ET_{BERB}$ ) e pelo produto $ET_0 \times Kc - ET_{FAO}$ , nas parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN). DAS: dias após semeadura.....	85
<b>Figura 4.8.</b> Coeficientes de cultivo gerados pelo método BERB (valores pontuais em círculos, valores médios para cada estágio em linha contínua) e curva dos coeficientes de cultivo estimados pelo método FAO para as parcelas 81 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN). DAS: dias após semeadura.....	87
<b>Figura 4.9.</b> Correlação entre os coeficientes de cultivo do meloeiro gerados pelo método BERB e estimados pelo método FAO para a parcela 81 e parcela 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN).....	88
<b>Figura 4.10.</b> Evolução do $K_{CBERB}$ e do índice de área foliar (IAF) durante o ciclo da meloeiro nas parcelas 81 e 35 da fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN).....	89
<b>Figura 4.11.</b> Correlação entre o $K_{CBERB}$ e IAF, para as parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN).....	90
<b>Figura 4.12.</b> Albedo da superfície no instante de passagem do satélite Landsat 5 , gerado com imagens do sensor TM (órbita 216, ponto 63) para os dias 31 de julho e 03 de outubro de 2009.....	92
<b>Figura 4.13.</b> Saldo de radiação diário ( $W m^{-2}$ ) gerado com imagens do TM - Landsat 5 (órbita 216, ponto 63) para os dias 31 de julho e 03 de outubro de 2009.....	96



<b>Figura 4.14.</b> Fração de evaporação diária gerada com imagens do TM Landsat - 5 (órbita 216, ponto 63) para os dias 31 de julho, 16 de agosto, 01 de setembro, 17 de setembro e 03 de outubro de 2009.....	100
<b>Figura 4.15.</b> Evapotranspiração acumulada no período de julho a outubro de 2009, gerada com imagens do TM - Landsat 5 (órbita 216, ponto 63). Em destaque as parcelas das propriedades avaliadas.....	104
<b>Figura 4.16.</b> Produtividade de água, com base na evapotranspiração da cultura ( $PA_{ET}$ ), do meloeiro cultivado no ano de 2009 em Mossoró – RN.....	111
<b>Figura 4.17.</b> Produtividade de água, com base na irrigação ( $PA_{IR}$ ), do meloeiro cultivado no ano de 2009 em Mossoró - RN.....	112
<b>Figura 4.18.</b> Fração de Uso da Água (FUA) do meloeiro cultivado no ano de 2009 em Mossoró - RN.....	114
<b>Figura 4.19.</b> Razão de consumo total (RCT) do meloeiro cultivado no ano de 2009 em Mossoró – RN.....	116
<b>Figura 4.20.</b> Suprimento Hídrico Relativo (SHR) do meloeiro cultivado no ano de 2009 em Mossoró - RN.....	117

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1.</b> Descrição das parcelas avaliadas na Fazenda Dinamarca: área, variedade cultivada e datas de plantio, colheita, colocação e retirada da manta, no ano de 2009.....	42
<b>Tabela 3.2.</b> Descrição das parcelas avaliadas na Fazenda Brazil Melon: área, variedade cultivada e datas de plantio, colheita, colocação e retirada da manta, no ano de 2009.....	42
<b>Tabela 3.3.</b> Descrição das parcelas avaliadas na Fazenda Fruta Vida: área, variedade cultivada e datas de plantio, colheita, colocação e retirada da manta, no ano de 2009.....	43
<b>Tabela 3.4.</b> Descrição das parcelas avaliadas na Fazenda Norfruit: área, variedade cultivada e datas de plantio, colheita, colocação e retirada da manta, no ano de 2009.....	43
<b>Tabela 3.5.</b> Duração dos estádios de desenvolvimento do meloeiro cultivado na Fazenda Fruta Vida (Mossoró - RN), no período de agosto de 2009 a janeiro/2010.....	46
<b>Tabela 3.6.</b> Lâmina de irrigação aplicada ao meloeiro cultivado na parcela 81 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), ano 2009.....	47
<b>Tabela 3.7.</b> Lâmina de irrigação aplicada ao meloeiro cultivado na parcela 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), ano 2009/2010...	47
<b>Tabela 3.8.</b> Vazão e espaçamento dos gotejadores utilizados no sistema de irrigação das propriedades avaliadas.....	69

<b>Tabela 4.1.</b> Médias diárias dos elementos meteorológicos em cada estágio fenológico da cultura, registrados na área experimental durante Etapa 1 (12 de agosto a 19 de outubro de 2009).....	72
<b>Tabela 4.2.</b> Médias diárias dos elementos meteorológicos em cada estágio fenológico da cultura, registrados na área experimental durante na Etapa 2 (04 de novembro de 2009 a 11 de janeiro de 2010).....	72
<b>Tabela 4.3.</b> Médias horárias das temperaturas da termojunção seca dos psicrômetros instalados sobre o dossel ( $T_{inferior}$ ) e um nível mais acima ( $T_{superior}$ ), do saldo de radiação (Rn), da Razão de Bowen ( $\beta$ ) e dos fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e calor no solo (G) para os dias 277 (P81) e 351 (P35).....	82
<b>Tabela 4.4.</b> Valores médios diários da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), evapotranspiração do meloeiro ( $ET_{BERB}$ e $ET_{FAO}$ ) e lâmina de irrigação (I), todas em mm, para as fases do manejo de irrigação do meloeiro nas parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), safra 2009/2010.....	84
<b>Tabela 4.5.</b> Valores da precipitação pluviométrica para o ano de 2009 no município de Mossoró, obtidos na estação meteorológica do INMET na Fazenda Norfruit (5°4' S, 37°22' W, 36 m) e na estação meteorológica da Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA (5°11' S, 37°20' W, 37 m).....	94

<b>Tabela 4.6.</b> Comparativo do albedo ( $\alpha$ ), radiação de onda longa emitida ( $R_{OL\uparrow}$ ), saldo de radiação instantâneo ( $Rn_{Inst.}$ ) e saldo de radiação diário ( $Rn_{24h}$ ) obtidos pelo SEBAL (subscrito “S”) e pelo BERB (subscrito “B”) para o pixel correspondente ao local de instalação dos sensores (Parcela 81 da Fazenda Fruta Vida, Mossoró, 2009).....	94
<b>Tabela 4.7.</b> Valores medidos pelo BERB e estimados pelo SEBAL dos fluxos de calor no solo ( $G$ ), sensível ( $H$ ) e latente ( $LE$ ) no momento de passagem do satélite e evapotranspiração diária ( $ET_{24}$ ) do meloeiro cultivado na parcela 81 da Fazenda Fruta Vida, Mossoró, 2009.....	103
<b>Tabela 4.8.</b> Produtividade agrícola ( $PA_{IR}$ ) e monetária ( $PMA$ ) da água, com base na irrigação, das parcelas avaliadas nas empresas agrícolas Dinamarca, Brazil Melon, Norfruit e Fruta Vida (Mossoró – RN, ano 2009).....	108

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\alpha$	Albedo da superfície	Adimensional
$\alpha_{toa}$	Albedo no topo da atmosfera	Adimensional
$\beta$	Razão de bowen	Adimensional
$\gamma$	Fator psicrométrico	kPa °C <sup>-1</sup>
$\Delta e$	Gradiente de pressão de vapor d'água acima do dossel	Adimensional
$\Delta T$	Gradiente de temperatura do ar acima do dossel	Adimensional
$\Lambda$	Fração de evaporação	
$\epsilon$	Razão entre os pesos moleculares do vapor d'água e do ar seco	Adimensional
$\epsilon_a$	Emissividade da atmosfera	Adimensional
$\epsilon_{NB}$	Emissividade da superfície na banda termal	Adimensional
$\epsilon_0$	Emissividade da superfície em larga banda	Adimensional
$\rho$	Densidade do ar	kg m <sup>-3</sup>
$\rho_\lambda$	Reflectância espectral	Adimensional
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman	W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>
$T_{sw}$	Transmissividade da atmosfera	Adimensional

$\Psi_m$	Fator de correção de estabilidade para transporte de momentum	-
$\Psi_h$	Fator de correção de estabilidade para transporte de calor	-
BERB	Balanco de Energia pela Razão de Bowen	-
$c_p$	Calor específico do ar à pressão constante	$\text{kJ kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$
$\cos\theta$	Cosseno do ângulo zenital do Sol	Adimensional
$d_r$	Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol	Adimensional
$d_w$	Índice de concordância de Wilmott	Adimensional
$e$	Pressão de vapor d'água	kPa
ET	Evapotranspiração	$\text{mm dia}^{-1}$
$ET_0$	Evapotranspiração de referência	$\text{mm dia}^{-1}$
$ET_{\text{BERB}}$	Evapotranspiração da cultura determinada pelo BERB	$\text{mm dia}^{-1}$
$ET_{\text{FAO}}$	Evapotranspiração da cultura determinada pelo método FAO-56	$\text{mm dia}^{-1}$
$ET_{\text{SEBAL}}$	Evapotranspiração da cultura determinada pelo SEBAL	$\text{mm dia}^{-1}$
FUA	Fração de uso da água	Adimensional
G	Fluxo de calor no solo	$\text{W m}^{-2}$
H	Fluxo de calor sensível	$\text{W m}^{-2}$
IVDN	Índice de vegetação da diferença normalizada	Adimensional

IVAS	Índice de vegetação ajustado para efeitos do solo	Adimensional
IAF	Índice de área foliar	Adimensional
k	Constante de Von Karman	-
Kc	Coeficiente de cultivo	Adimensional
Kc <sub>e</sub>	Coeficiente de evaporação	Adimensional
Kc <sub>b</sub>	Coeficiente basal da cultura	Adimensional
KC <sub>FAO</sub>	Coeficiente de cultivo do manual FAO-56	Adimensional
K <sub>h</sub>	Coeficiente de transferência turbulenta de calor	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
K <sub>v</sub>	Coeficiente de transferência turbulenta de vapor d'água	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
L	Comprimento de Monin-Obukhov	m
LE	Fluxo de calor latente	W m <sup>-2</sup>
L <sub>v</sub>	Calor latente de vaporização	kJ kg <sup>-1</sup>
L <sub>λ</sub>	Radiância espectral monocromática	W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> μ <sup>-1</sup>
P	Pressão atmosférica	kPa
PA	Produtividade de água	Kg m <sup>-3</sup>
PA <sub>IR</sub>	Produtividade de água com base na irrigação	Kg m <sup>-3</sup>
PA <sub>ET</sub>	Produtividade de água com base na evapotranspiração	Kg m <sup>-3</sup>
P35	Parcela n° 35 da fazenda Fruta Vida	-
P81	Parcela n° 81 da fazenda Fruta Vida	-

$R^2$	Coeficiente de determinação da regressão linear	Adimensional
$R_a$	Radiação no topo da atmosfera	$W m^{-2}$
$r_{ah}$	Resistência aerodinâmica ao transporte de calor	$s m^{-1}$
$R_g$	Radiação de onda curta incidente	$W m^{-2}$
$RM$	Razão média	Adimensional
$RQME$	Raiz quadrada do quadrado médio do erro	Mesma da grandeza avaliada
$R_{L\uparrow}$	Radiação de onda longa emitida pela superfície	$W m^{-2}$
$R_{L\downarrow}$	Radiação de onda longa incidente	$W m^{-2}$
$R_{S\downarrow}$	Radiação de onda curta incidente	$W m^{-2}$
$RCT$	Razão de consumo total	Adimensional
$R_n$	Saldo de radiação	$W m^{-2}$
$SEBAL$	Surface Energy Balance Algorithm for Land	-
$SHR$	Suprimento hídrico relativo	Adimensional
$T_a$	Temperatura do ar	$^{\circ}C / K$
$T_s$	Temperatura da superfície	$^{\circ}C / K$
$u_x$	Velocidade do vento na altura x	$m s^{-1}$
$u^*$	Velocidade de fricção	$m s^{-1}$
$Z_{om}$	Coeficiente de rugosidade ao transporte de momentum	m
$W$	Água precipitável	mm



## RESUMO

Atualmente o meloeiro é o segundo fruto mais importante na pauta das exportações brasileiras, sendo o estado do Rio Grande do Norte o principal produtor no Brasil, com 41% do total da área plantada. O cultivo do meloeiro nesta região é feito utilizando-se cobertura plástica no solo e depende da irrigação, suprida com água de aquíferos subterrâneos. Com a crescente demanda de alimentos, o uso da água na agricultura de regiões semiáridas deve considerar a aplicação da menor quantidade possível de água que possa garantir uma boa produção e conservação do solo. O presente estudo tem por objetivo determinar as necessidades hídricas e a produtividade de água do meloeiro irrigado cultivado com *mulch* no semiárido do Rio Grande do Norte. Utilizou-se a técnica do Balanço de Energia pela Razão de Bowen (BERB) e o algoritmo Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) para determinar coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) e a evapotranspiração de áreas cultivadas com melão em quatro fazendas no município de Mossoró (Dinamarca: 4°54'28" S; 37°24'06" W; 17 m, Brazil Melon: 4°54'26" S; 37°23'02" W; 29 m, Fruta Vida: 4°59'52" S; 37°23'09" W; 54 m e Norfruit: 4°54'10" S; 37°22'01" O; 36 m). O experimento de campo com instrumentos para determinar o BERB foi instalado em duas épocas dentro da safra 2009/2010 na Fazenda Fruta Vida. Para implementação do SEBAL foram utilizadas cinco imagens do mapeador temático do satélite Landsat 5. Índices de produtividade e uso da água foram aplicados com dados coletados em campo e gerados pelo SEBAL. A média do  $K_c$  determinado nas duas campanhas de campo foi 0,26, 0,96 e 0,63, para os estádios inicial, médio e final, respectivamente. Os valores estimados pelo SEBAL foram próximos aos encontrados em campo, com máxima diferença de 13% entre os métodos. A produtividade e os índices de uso da água variaram bastante nas áreas estudadas. O suprimento relativo de água à cultura foi satisfatório, porém a média da fração de uso da água foi de 0,61, ou seja, 39% da água aplicada não foi utilizada pelas plantas. A média da produtividade de água com base na irrigação foi 6,47 kg m<sup>-3</sup>. A análise econômica do uso da água revelou alta produtividade do meloeiro, com média de 4,41 US\$ m<sup>-3</sup>.

**Palavras-chave:** melão, evapotranspiração, Razão de Bowen, SEBAL, uso da água.

## ABSTRACT

Currently, melon is the second most important fruit in Brazilian exports, and the state of Rio Grande do Norte is the largest producer in Brazil, with 41% of the total planted area. The melon is cultivated in this region using plastic cover (*mulch*) on the ground and depends on groundwater irrigation. With the growing demand for food, agricultural water use in semiarid regions should consider applying the least amount of water that can ensure good yields and soil conservation. The objective of this study is to determine the water needs and water productivity of irrigated melon cultivated with *mulch* in the semiarid region of Rio Grande do Norte. For this purpose we used the Bowen Ratio Energy Balance (BREB) method and the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) to determine crop coefficients ( $K_c$ ) and evapotranspiration of melon crops in four farms in the municipality of Mossoró (Dinamarca: 4°54'28" S; 37°24'06" W; 17 m, Brazil Melon: 4°54'26" S; 37°23'02" W; 29 m, Fruta Vida: 4°59'52" S; 37°23'09" W; 54 m e Norfruit: 4°54'10" S; 37°22'01" O; 36 m). The BREB field experiment was carried out twice in the 2009/2010 season. Five Landsat Thematic Mapper-5 images were processed to determine evapotranspiration by SEBAL. Indicators of productivity and water use were applied to data collected in the field and generated by SEBAL. The average  $K_c$  determined in two field experiments was 0.26, 0.96 and 0.63 for initial, middle and end stages, respectively. The values estimated by SEBAL were close to those found by BREB with a maximum deviation of 16% between the methods. Productivity and water use indicators varied widely in the studied area. The relative water supply for the crop was satisfactory, however the average deplect fraction was 0.61, revealing that 39% of applied water was not used by plants. The average crop water productivity based on irrigation was 6.47 kg m<sup>-3</sup>. The economic analysis of water productivity revealed high values to melon, with an average of 4.41 US \$ m<sup>-3</sup>.

**Key-words:** melon, evapotranspiration, Bowen Ratio, SEBAL, water use.

## **1. INTRODUÇÃO**

A região Nordeste é a maior produtora de melão no país e o estado do Rio Grande do Norte (RN) ocupa a primeira posição nacional. Em 2009, o RN possuía 7.182 ha plantados, referentes a 41% do total da área cultivada com melão no país, com produção de 201.259 toneladas. Quase R\$ 124 milhões foram gerados no RN com a produção de melão no ano de 2009, o que correspondeu a 46% do total produzido no Brasil (IBGE, 2010). O município de Mossoró é o principal produtor de melão neste estado, com produção destinada prioritariamente ao mercado externo. Na pauta das exportações em 2010 (IBRAF, 2011), o melão foi o segundo fruto de maior importância econômica no Brasil (aproximadamente US\$ 122 milhões), ficando atrás apenas da uva (US\$136,7 milhões). Constata-se então a importância do agronegócio do melão na economia brasileira e sua importância como geradora de renda e emprego na Região Nordeste.

As condições climáticas da região Nordeste, com temperaturas entre 25 e 30°C, alta incidência anual de radiação solar e baixa umidade relativa do ar são favoráveis ao desenvolvimento do meloeiro (Souza et al., 1999). Estas características proporcionam a obtenção de frutos com melhor qualidade, apreciados no mercado internacional, em épocas em que não há produção do

mesmo na Europa. A produção de melão no Brasil ocorre no período da entressafra da Espanha, o maior produtor europeu, criando espaço para suprir-se este grande mercado (Sobrinho et al., 2008).

A produção agrícola em Mossoró, como em praticamente todo o semiárido, é dependente da irrigação, especialmente as empresas exportadoras de frutas, que precisam manter a regularidade na qualidade dos produtos. O município apresenta evaporação média anual de 2.200 mm, e precipitação média anual em torno de 650 mm, concentrada nos meses de fevereiro a abril (INMET, 2011). O fator irrigação é um dos principais componentes no orçamento do processo produtivo, sendo fundamental sua quantificação para otimizar a utilização dos recursos hídricos, garantir a sustentabilidade e o sucesso do empreendimento (Bernardo et al., 2009). Ademais, competições por recursos hídricos escassos são atualmente observadas em todo o mundo, especialmente onde o uso da água não é regulamentado e controlado, evidenciando-se em declínio de lençóis freáticos, seca em estuários e desequilíbrio de ecossistemas aquáticos (Perry et al., 2009). Os cenários apontados pelas mudanças climáticas tendem a piorar a situação já existente de escassez de recursos hídricos. Estima-se que haverá diminuição de 10 a 30% do escoamento anual médio dos rios e disponibilidade de água nas regiões secas das latitudes médias e dos trópicos, até a metade do atual século (Parry et al., 2007).

Diante dessas evidências, torna-se ainda mais imperiosa a exploração agrícola de forma a maximizar a produção racionando-se os recursos naturais, mais especificamente, a água. A aplicação racional de água às plantas parte do princípio de atender às necessidades hídricas das mesmas. A evapotranspiração de uma cultura representa a sua demanda hídrica, pois integra as perdas por

transpiração e evaporação, refletindo as necessidades de acordo com as diferentes fases de crescimento e as condições de manejo adotadas.

Uma característica da produção de melão na região de Mossoró é o uso de cobertura plástica no solo com filmes de polietileno, prática que aqui será denominada *mulch*. Esta prática tem por objetivo reduzir as perdas de água por evaporação e a ocorrência de plantas invasoras, como também evitar o contato direto do fruto com o solo. Além do *mulch*, os produtores da região utilizam mantas de polipropileno sobre as plantas, com finalidade de minimizar o ataque de pragas. A adoção destas técnicas traz mudanças no balanço de radiação à superfície, no tocante à quantidade relativa de energia refletida ou emitida pela mesma. Da mesma forma, a relação entre os fluxos de energia para aquecimento do ar, do solo e para evaporação é influenciada. Portanto, o uso do *mulch* e da manta têxtil cria impactos na superfície evaporativa e há carência de estudos sobre a demanda hídrica do meloeiro sob tais condições.

Os métodos de obtenção da evapotranspiração por meio do balanço de energia são potencialmente interessantes para se analisar o impacto das práticas de manejo da cultura nos fluxos não radiativos e, portanto, na perda de água pela superfície. O Balanço de Energia pela Razão de Bowen é um método bastante aplicado na determinação da evapotranspiração de culturas agrícolas, principalmente por ser simples e não requisitar informações sobre as características aerodinâmicas da superfície.

O manejo eficiente da água na irrigação deve considerar a aplicação da menor quantidade possível de água que possa promover uma boa produção e conservação do solo, garantindo a sustentabilidade destes recursos. Atualmente, as pesquisas sobre demanda hídrica dos cultivos vêm avaliando a “rentabilidade”

do uso da água, ou seja, quanto produto comercializável (em peso ou valor econômico) é obtido por unidade de água aplicada ou consumido na sua produção (Ahmad et al., 2009; Sakar et al., 2010; Cai et al., 2011) . Estes índices são denominados por alguns autores como “eficiência do uso de água” ou “produtividade de água”. Em maior escala espacial, utilizando técnicas de sensoriamento remoto, a determinação da produtividade de água auxilia em estudos de alocação de recursos hídricos e dos impactos nas reservas hídricas de uma região, causados pela mudança da cobertura do solo ou das espécies cultivadas.

A irrigação e quase todo abastecimento humano em Mossoró são providos com água subterrânea, cuja captação é feita do arenito Açú, em poços com cerca de 1000 m de profundidade, e do calcário Jandaíra, com profundidade em torno de 100 m (Medeiros et al., 2003). Segundo Mascarenhas et al. (2005), 94% dos poços no município têm água de má qualidade, com alto teor de sais. Como a evaporação anual em Mossoró supera o volume anual das precipitações, perdas com manejo inadequado da irrigação tornam-se ainda mais preocupantes, pois podem contribuir para o aumento da salinidade destes reservatórios subterrâneos. Portanto, estudos de produtividade e uso da água são importantes para manutenção da capacidade produtiva de alimentos nesta região e a conservação dos lençóis freáticos, evitando conflitos futuros pelo uso da água.

O presente estudo tem por objetivo determinar as necessidades hídricas e a produtividade de água do meloeiro irrigado cultivado com *mulch* no semiárido do Rio Grande do Norte, a partir do método do Balanço de Energia pela Razão de Bowen e pelo algoritmo SEBAL, utilizando dados complementares obtidos em experimento de campo conduzido do período de agosto de 2009 a janeiro de

2010. Para tanto, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos: a) obter a evapotranspiração do meloeiro em campo e com as imagens orbitais; b) determinar os coeficientes de cultivo para o meloeiro na região de estudo; c) avaliar o uso da água na produção de melão, utilizando índices apropriados; e d) propor estratégias de manejo da água, visando o uso racional deste insumo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. O Meloeiro (*Cucumis melo* L.)

O meloeiro é uma planta olerícola, pertencente à família Cucurbitaceae, originária dos vales quentes do Irã e do Noroeste da Índia (Filgueira, 2000). O seu fruto é muito apreciado e consumido em larga escala na Europa, Japão e Estados Unidos. Rico em vitaminas A, B, B2, B5 e C, sais minerais como potássio, sódio e fósforo, apresenta valor energético relativamente baixo e é consumido *in natura* ou na forma de suco. O fruto maduro tem propriedades medicinais, sendo considerado calmante, refrescante, diurético e laxante (SENAR, 2007).

**2.1.1. Exigências climáticas:** O meloeiro é uma cultura de climas quentes que necessita de temperaturas acima de 20°C para seu desenvolvimento e produção. Em regiões de clima quente e seco os frutos apresentam teor de açúcar acima de 10° Brix, sabor agradável, mais aroma e maior consistência, características desejáveis para comercialização, principalmente no mercado externo. A ocorrência de chuvas no período de maturação dos frutos e colheita pode provocar injúrias nos mesmos e reduzir o teor de açúcar, além de favorecer as doenças fúngicas (Angelotti e Costa, 2010). O meloeiro não tolera tempo frio, tampouco geadas (SENAR, 2007). Eis porque as condições semiáridas do



Nordeste brasileiro são ideais à produção do melão, desde que haja disponibilidade de água para a irrigação.

**2.1.2. Variedades cultivadas:** Existem inúmeras variedades cultivadas de melão no mundo, que são classificadas em tipos e dentro destes, os híbridos. Comercialmente, os tipos são classificados como aromáticos ou inodoros (SENAR, 2007). Os tipos são: Amarelo, Pele de Sapo, Cantaloupe, Gália, Honey Dew e Charentais (Costa e Grangeiro, 2010). No Brasil predomina a produção do Tipo Amarelo, correspondendo a 90% do total (Sobrinho et al., 2008). Entretanto, a tendência de mercado é de aumento da demanda por melões do grupo Cantalupensis, aromáticos, de polpa salmão, com bom sabor e maior teor de açúcar. Para os melões do tipo “Pele de Sapo”, “Gália” e “Charentais”, a principal oportunidade de expansão da cultura é para atender o mercado externo, especialmente o europeu (Resende e Costa, 2010).

O melão Amarelo, também conhecido como melão Espanhol, tem casca amarela e polpa variando de branco a creme, com formato redondo-ovalado. Por ser mais resistente ao transporte e manuseio, bem como apresentar menor perecibilidade, é o mais produzido no país (SENAR, 2007). Existem 10 híbridos do melão Amarelo, dentre os quais Iracema e Goldex, de alta produtividade e qualidade, apropriados para exportação (Costa e Grangeiro, 2010). Outro tipo bastante cultivado nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará é o “Pele de Sapo”, que apresenta os híbridos Sancho, Medelín e Grand Prix, todos três com padrão de frutos para exportação. Os híbridos mais cultivados em Mossoró são o Sancho e o Medelin. O híbrido Sancho é uma planta muito vigorosa, que apresenta resistência a fusariose e ao oídio. Os frutos têm formato ovalado, reticulado com peso médio de 1,8 kg a 3,5 kg, com polpa firme, muito doce e de

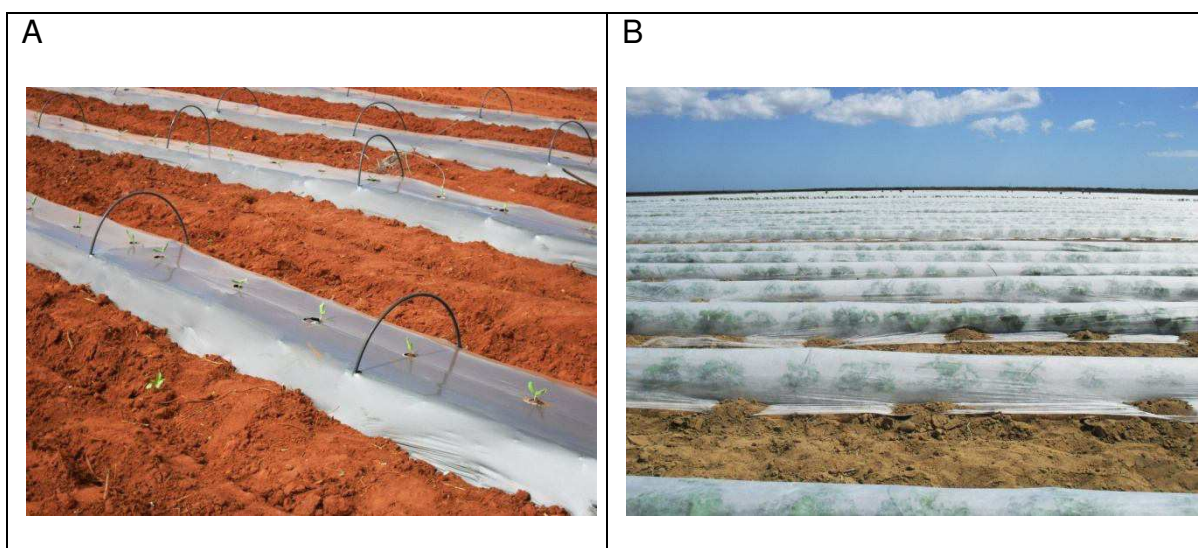
coloração creme. O ciclo médio de produção é de 70 a 80 dias. O híbrido Medelín é muito produtivo, apresenta fruto de formato ovalado, coloração de polpa branca e sólidos solúveis variando de 10º Brix a 14º Brix, com colheita iniciando a partir dos 65 dias (Costa e Grangeiro, 2010). Os demais tipos, todos aromáticos, também bastante apreciados no mercado externo, necessitam de cuidados especiais de pós-colheita e transporte, incluindo refrigeração (SENAR, 2007).

**2.1.3. Aspectos do cultivo do melão:** O cultivo do melão, como de outras hortaliças, apresenta como característica peculiar o uso de *mulch* plástico sobre o solo (Figura 2.1). Esta prática apresenta vários benefícios tais como: previne a ocorrência de pragas, doenças e plantas invasoras e impede o contato dos frutos com o solo (Figueirêdo et al., 2008); reduz as perdas de nutrientes por lixiviação e as perdas de água por evaporação do solo (Sampaio e Araújo, 2001) e relaciona-se com o aumento do número e qualidade de frutos (Negreiros et al., 2005). Por outro lado, Figueirêdo et al. (2008) alertam que essa prática provoca aumento da temperatura do solo, o que pode contribuir para perda da biodiversidade do solo, além do impacto resultante da contaminação do solo com restos plásticos.

A influência da cobertura plástica no balanço de radiação depende bastante da cor do material. Plásticos brancos ou prateados refletem mais radiação solar, sendo estes últimos recomendados para regiões mais quentes. Já em regiões frias ou de alta amplitude térmica diária, os plásticos transparentes ou escuros são mais indicados (Negreiros et al., 2005).

A utilização de mantas de polipropileno ou tecido-não-tecido (TNT), também conhecida como agrotêxtil, tornou-se comum entre as médias e grandes empresas do polo agrícola Açu-Mossoró, no Rio Grande do Norte nos últimos anos, com intuito de controlar o ataque da mosca branca e da mosca minadora

(Medeiros et al., 2007). Estas mantas são empregadas desde o dia da emergência das plântulas ou do transplântio até o momento da floração. Sua aplicação é feita sobre aros colocados acima das fileiras de plantas, de forma que as plantas crescem protegidas por elas (Figura 2.1). A cobertura têxtil influencia o microclima das proximidades das plantas, no tocante à temperatura, radiação incidente, umidade relativa e velocidade do vento (Gimenez et al., 2002). Medeiros et al. (2007) constataram que a cobertura têxtil aumentou o número de frutos e a produtividade do melão Cantaloupe, tal como Gimenez et al. (2002) que verificaram aumento na qualidade de espinafre, repolho e alface produzidos com a mesma cobertura.



**Figura 2.1.** Sistema de cultivo do meloeiro em Mossoró-RN. A - cobertura plástica utilizada sobre o solo (foto de 16 de agosto de 2009, parcela 81 da Fazenda Fruta Vida) e B - manta de polipropileno aplicada sobre a fileira de plantas (foto de 26 de novembro de 2009, parcela 35 da Fazenda Fruta Vida).

A utilização de mantas pode estar associada ao menor consumo de água pelas plantas, em virtude do aumento da resistência ao fluxo de vapor. Medeiros et al. (2007) verificaram que nos cultivos onde aplicou-se a manta combinada a

*mulch* plástico preto a produção de frutos não foi afetada mesmo quando reduziu-se a lâmina de irrigação a 84% do padrão. Já associando a manta com plástico de cor amarela, a diminuição na lâmina de irrigação afetou consideravelmente a produção. Os autores consideraram como lâmina padrão a quantidade de água estimada a partir da  $ET_0$  e dos coeficientes de cultivos sugeridos no Manual 56 da FAO (Allen et al., 1998). Até o momento não há registros na literatura especializada de pesquisas com determinações da lâmina evapotranspirada do meloeiro cultivado sobre *mulch* com a utilização das mantas de TNT.

**2.1.4. Necessidades hídricas:** A aplicação de água via irrigação é fundamental na produção de melão no Nordeste do Brasil. Miranda et al. (2008) recomendam irrigação por gotejamento pela maior eficiência no que diz respeito à redução das perdas por evaporação, pela economia de mão de obra e boa aplicação de fertilizantes. Souza et al. (1999) constataram que a eficiência do uso da água no meloeiro é maior quando as frequências de irrigação são maiores. Em solo arenoso sob fertirrigação por gotejamento, estes autores comprovaram que a frequência de irrigação diária, com aplicações duas vezes por dia, promoveu melhor produção e produtividade.

As necessidades hídricas do meloeiro variam com o clima, variedade, densidade de plantio, manejo de irrigação e cobertura do solo adotada. Para o meloeiro irrigado por gotejamento no Nordeste do Brasil, o consumo de água varia de 240 a 350 mm por ciclo (Miranda et al., 2008). Em Lavello, Itália, Lovelli et al. (2005) registraram 314 mm e 266 mm consumidos pelo meloeiro cultivado com e sem *mulch*, respectivamente. Miranda et al. (1999) determinaram, para região litorânea do Ceará, evapotranspiração de 251 mm para todo ciclo em cultivo do tipo Gold Mine, registrando diferenças entre os coeficientes de cultivo

determinados em sua pesquisa com os sugeridos no Manual 56 da FAO para Irrigação e Drenagem. Os autores sugeriram a realização de mais pesquisas com outras variedades para levantar dados mais seguros para o manejo da irrigação na região.

Em regiões áridas ou semiáridas, o baixo volume e a irregularidade das precipitações tornam necessário o uso de água de má qualidade na irrigação. O melão é uma cultura importante em tais regiões com problemas de salinidade (Botía et al., 2005), situação que pode ser agravada pelo manejo incorreto da irrigação por gotejamento (Bernardo et al., 2005). Na região oeste do Rio Grande do Norte, a água utilizada na irrigação do meloeiro provém de poços, sendo considerada de baixa qualidade por apresentar salinidade média de  $2,5 \text{ dSm}^{-1}$  (Silva, M.C. et al., 2005). O meloeiro é considerado uma planta moderadamente sensível à salinidade. Valores de condutividade elétrica do extrado de saturação do solo de até  $2,2 \text{ dSm}^{-1}$  não afetam o rendimento da cultura (Miranda et al., 2008).

## **2.2. Evapotranspiração das culturas**

A evapotranspiração (ET) é o fenômeno no qual a água passa para a atmosfera, na forma de vapor, pela superfície do solo e pela planta, através dos estômatos e pela água na superfície de galhos e folhas (Pereira et al., 1997). Além do planejamento da irrigação, o cômputo da evapotranspiração também é utilizado na execução de leis do uso de água e em estudos de bacias hidrográficas (Bastiaanssen et al., 2000).

A ET é determinada pelas condições climáticas, aspectos da cultura e do manejo desta, do solo e da água (Allen et al., 1998; Pereira et al., 2002). Os principais elementos atmosféricos que afetam a evapotranspiração são a radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento, os quais combinados definem a demanda atmosférica por vapor d'água (Pereira et al., 2002). Diferenças na resistência à transpiração, altura e rugosidade do dossel vegetal, albedo e cobertura do solo causam diferenças nos níveis da ET. Portanto, a espécie, variedade e estágio de desenvolvimento devem ser considerados (Allen et al., 1998). Fatores do solo (salinidade, fertilidade, capacidade de água, impedimentos físicos), controle de pragas e doenças, método de irrigação são aspectos do ambiente e do manejo da cultura que influenciam a quantidade de água evapotranspirada, assim como o uso de cobertura no solo (Allen et al., 1998).

Existem diversos métodos para determinar a ET, alguns mais adequados que outros em termos de precisão ou custo, ou para escalas de tempo e espaço. A ET pode ser determinada através de medidas de evaporação de tanques, técnicas baseadas no balanço de energia à superfície ou o balanço de massa, equações empíricas de diversos níveis de complexidade, correlação de vórtices turbulentos ou métodos combinados. Os métodos empíricos são resultantes das correlações entre a ET e determinados elementos meteorológicos, enquanto que os métodos combinados consideram os efeitos conjuntos do balanço de energia com as características aerodinâmicas da superfície (Pereira et al., 1997). Medidas precisas requerem sistemas com boa calibração e manutenção e, em muitos casos, conhecimento dos fenômenos físicos que governam o método de medida (Allen et al., 2011).

A evapotranspiração é um fenômeno regido simultaneamente pelos princípios de conservação de massa e energia na camada limite acima do dossel vegetativo da planta (Sediyama, 1996). Desta forma, a ET pode ser obtida tanto pelo balanço de água na zona de abrangência do sistema radicular das plantas quanto pelo balanço de energia em nível da superfície evaporante. O balanço de água no solo é um método baseado no princípio da conservação de massa, o que possibilita determinar a ET de forma indireta, como resíduo da equação do balanço hídrico. O lisímetro de pesagem, que também se vale do mesmo princípio, foi desenvolvido para determinar a ET de forma direta. A lisimetria é considerada historicamente como metodologia adequada para a correta obtenção da ET (Rana e Katerji, 2000), usada para prover informações sobre desenvolvimento, calibração e validação de métodos de estimativa da ET (Allen et al., 2011).

Os métodos baseados na conservação de energia determinam a ET a partir do cômputo do fluxo de calor latente, tais como o método da Razão de Bowen e técnicas com sensoriamento remoto, a exemplo dos algoritmos SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) e METRIC (Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration). Outras aproximações com sensoriamento remoto utilizam índices de vegetação para determinar a ET ou coeficientes de cultivo (Wang et al, 2006; Bezerra et al., 2010, Campos et al., 2010).

A medida da evapotranspiração muitas vezes é difícil e onerosa, visto que requer medidas precisas de parâmetros do solo e o da atmosfera, além de características sobre a cultura em questão (Pereira et al., 1997). Tais

determinações podem ser inviáveis em termos práticos, ou seja, no manejo diário da irrigação.

Em caráter operacional, a evapotranspiração é usualmente determinada pelo método combinado FAO Penman-Monteith (Allen et al, 1998), segundo o qual calcula-se a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), relativa à uma área coberta por uma cultura hipotética, de altura em torno de 0,12 m, com resistência aerodinâmica ao transporte de vapor de  $69 \text{ s m}^{-1}$ , sem restrições hídricas e em bom desenvolvimento. Para determinar-se a evapotranspiração da cultura em questão, multiplica-se a  $ET_0$  pelo  $K_c$ , que é o coeficiente de cultivo da referida cultura.

O  $K_c$  engloba as características da cultura em relação à cultura de referência no que se refere à resistência superficial ao transporte de vapor d'água, arquitetura e morfologia que influenciam na transpiração. Tais características variam ao decorrer do desenvolvimento da cultura, de forma que, para cada estágio de desenvolvimento, há um  $K_c$  específico (Allen et al., 1998). Doorenbos e Pruitt (1992) apontam, além das características da cultura, a data de plantio, taxa de crescimento das plantas e as condições climáticas como fatores que afetam o valor do  $K_c$ .

Allen et al. (1998) no manual para Irrigação e Drenagem da FAO abordam duas formas de coeficiente de cultivo: o  $K_c$  simples e o  $K_c$  dual. O  $K_c$  simples engloba a evaporação do solo e transpiração da cultura conjuntamente. Já o  $K_c$  dual estabelece dois elementos diferentes, o coeficiente basal ou de transpiração da cultura –  $K_{cb}$  e o coeficiente de evaporação do solo –  $K_e$ . Nesta publicação, os autores apresentam valores de  $K_c$  para os estádios inicial, médio e final das



culturas, desenvolvidos para regiões com umidade relativa mínima do ar de 45% e velocidade do vento média de  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ .

Muitos dos coeficientes de cultivo disponibilizados na literatura especializada não refletem as condições locais onde são aplicados, pois foram determinados em regiões e condições de cultivo diferentes (Inman-Bamber e McGlinchey, 2003; Lovelli et al., 2005; Campos et al., 2010). Em relação à área deste estudo há particularidades no cultivo, a exemplo do *mulch* plástico e cobertura com mantas de polipropileno branco. Estudos locais são, portanto, importantes no esforço de proporcionar subsídios ao uso racional da água.

### **2.3. Balanço de Energia pela Razão de Bowen**

O conhecimento dos componentes do balanço de energia à superfície é imprescindível para interpretar corretamente o balanço de água e o microclima local (Hernandez- Ramirez et al., 2010), com ampla aplicação nos estudos de agricultura, hidrologia, silvicultura, modelagem atmosférica e sensoriamento remoto (Fritschen e Fritschen, 2005). Após as trocas radiativas entre superfície e atmosfera em um determinado período de tempo, o saldo de radiação ( $R_n$ ) é distribuído entre os fluxos não-radiativos à superfície, destinado fundamentalmente ao aquecimento do ar atmosférico, através do fluxo de calor sensível ( $H$ ), ao aquecimento do solo, através do fluxo de calor no solo ( $G$ ) e à evaporação da água, através do fluxo de calor latente ( $LE$ ). Solucionando-se a equação do balanço de energia, por meio da determinação de  $R_n$ ,  $G$  e  $H$  é possível obter  $LE$  e, por conseguinte, a evapotranspiração. A proporção dos fluxos no balanço de energia depende da superfície em questão. Segundo Jury et

al. (1991) em solo seco e nu, o componente LE do balanço de energia é praticamente nulo em relação a Rn, ao passo que numa área vegetada sem deficiência hídrica e em fase de máximo desenvolvimento vegetativo, LE pode representar 70% de Rn.

Dentre os métodos de estimativa da ET pelo balanço de energia destaca-se o método do Balanço de Energia com Razão de Bowen - BERB, há muito avaliado e recomendado por vários autores para diversas culturas (Jara et al., 1998; Azevedo et al., 2003; Zeggaf et al., 2008, Zhang, 2008; Takagi et al., 2009; Hou et al., 2010; Zhang et al., 2010), aplicado também em estudos de vegetação natural (Savage et al., 2009). Bowen (1926) demonstrou que a difusão de vapor d'água de uma superfície de água para a coluna de ar logo acima é exatamente igual à difusão de calor da mesma superfície para a coluna de ar acima desta. A partir daí formulou uma razão entre a perda de calor por condução e a perda de calor por evaporação, conhecida como Razão de Bowen -  $\beta$ . Esta relação foi posteriormente estendida para uso em diversas outras superfícies (Fritschen e Fritschen, 2005).

O BERB considera como energia disponível a diferença (Rn - G), dividindo-a entre calor sensível e calor latente. A razão entre estes dois fluxos ( $\beta$ ) é dada por (PEREZ et al, 1999):

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{-\rho c_p K_h dT_a / dz}{-(L_v \rho \epsilon / P) K_v de / dz} \quad (2.1)$$

em que  $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $1,01 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $T_a$  é a temperatura do ar ( $^\circ\text{C}$ ),  $z$  é a altura de medida (m),  $e$  é a pressão atual de vapor d'água (kPa),  $\epsilon$  é a razão entre os pesos moleculares do vapor d'água e do ar seco (0,622),  $K_h$  e  $K_v$  são os coeficientes de

transferência turbulenta de calor e de vapor d'água, respectivamente ( $m^2 s^{-1}$ ),  $L_v$  é o calor latente de vaporização ( $kJ kg^{-1}$ ) e  $P$  é a pressão atmosférica (kPa). Denomina-se fator psicrométrico, “ $\gamma$ ” a relação ( $c_p P / L \varepsilon$ ).

O método BERB apresenta as seguintes suposições: existência de condição de estabilidade na atmosfera; transporte de calor e vapor d'água em apenas uma direção, a vertical; e homogeneidade da superfície no tocante às fontes e sumidouros de calor, vapor d'água e momentum. Na aplicação do BERB assume-se que os coeficientes de difusividade de calor ( $K_h$ ) e difusividade de vapor d'água ( $K_v$ ) são iguais (Fritschen e Fritschen, 2005). A equidade desses coeficientes pode não ser válida em dosséis de florestas esparsas ou para culturas em fileiras que não atingiram toda cobertura do solo (Allen et al., 2011).

O transporte unidirecional de calor e massa implica em gradiente horizontal nulo. Para a hipótese de a unicidade de fluxos verticais ser válida, as medidas devem ser realizadas dentro da camada limite interna. Isto significa que é necessária uma bordadura - *fetch* ( $f$ ), adequada que permita ajuste do perfil à altura das medidas superiores ( $h$ ). Alguns autores sugerem que a relação  $h / f$  seja 1:100 (Perez et al., 1999; Tood et al, 2000; Payero et al., 2003; Fritschen e Fritschen, 2005). A condição de equidade dos coeficientes de difusividade de calor e vapor, assumida pelo método, é questionada quando se verifica advecção de calor sensível na área de tomada de dados (Lee et al., 2004; Gavilán e Berengena, 2007). Tood et al. (2000) encontraram grandes diferenças na determinação do fluxo de calor latente entre BERB em comparação à medidas com lisímetro de pesagem quando ventos quentes e secos incidiam na área amostrada.

A exatidão na obtenção da ET neste método depende da precisão da razão de Bowen ( $\beta$ ), a qual está sujeita à acurácia das medidas dos instrumentos (Perez et al., 1999). Providências devem ser tomadas na área de amostragem para que os dados demonstrem fielmente as condições da superfície em questão. Além da adoção de um *fetch* adequado, a instalação dos sensores de temperatura e umidade do ar segue alguns critérios. Segundo Allen (2011), a altura inferior de medida dos gradientes de  $T_a$  e  $e$  ( $z_1$ ) deve ser em torno de 0,30 m acima do dossel vegetal, no caso de áreas agrícolas homogêneas e acima deste valor para culturas altas e espaçadas ou ambientes de vegetação nativa. A altura superior de medida ( $z_2$ ) é 1 a 2 m acima de  $z_1$ . Fritschen e Fritschen (2005) informam que  $z_1$  deve ser pelo menos cinco (5) vezes o parâmetro da rugosidade da superfície ( $z_0$ ). Como  $z_0 = 0,13$  da altura da vegetação ( $h$ ) para superfícies homogêneas, e o plano de deslocamento da vegetação é  $0,64 h$ , então  $z_1 = 5 \times 0,13h + 0,64h = 1,29h$ . Os mesmo autores recomendam que  $z_2$  esteja dentro da camada interna limite da superfície adjacente. O limite da camada interna é sinalizado por uma mudança nas características de rugosidade ou umidade da superfície e à medida que esta camada aumenta, deve-se elevar a altura  $z_2$ . Uma estimativa conservativa da altura da camada limite interna para medidas de perfil de vento é 100 vezes o *fetch* adotado.

Critérios devem ser adotados para que as medidas do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo sejam representativas da área em questão. O saldo de radiação deve ser medido em altura suficiente que represente a condição média da superfície na área de medida contra a direção do vento, ou seja, no *fetch* adotado (Allen et al., 2011). Fritschen e Fritschen (2005) afirmam que 95% da área de visada do saldo-radiômetro está contida em um círculo com diâmetro de

nove vezes a altura do instrumento. Portanto, as medidas podem ser contaminadas pela reflectância e temperatura dos objetos nesta área.

As placas de fluxo de calor no solo são instaladas a pequenas profundidades: 0,02 m (Azevedo et al., 2003; Teixeira et al., 2008a), 0,05 m (Todd et al., 2000) e até 0,08 m (Galiván e Berengena, 2007). Segundo Allen et al. (2011), a instalação a menores profundidades reduz os erros associados às mudanças de temperatura acima da placa. Os mesmos autores recomendam que dois ou mais fluxímetros devem ser instalados em cada sistema BERB para minimizar os efeitos da heterogeneidade espacial, ou seja, em locais a sol pleno e sombreados, na linha de plantio e nas entrelinhas.

O BERB é o método meteorológico mais conservativo para medição de fluxo de vapor, pois o saldo de radiação impõe limites na magnitude dos fluxos de calor latente e sensível (Fritschen e Fritschen, 2005). Entretanto, caso nenhum valor de  $(R_n - G)$  e  $\beta$  possa dar uma solução correta para valores e sinais de  $H$  e  $LE$ , o método falha e tais dados devem ser descartados (Perez et al., 1999). Uhland et al. (1996) recomendaram como critério inicial de qualidade que sejam descartados os dados de pressão de vapor d'água e temperatura inferiores à resolução dos sensores. Desta forma, sugere eliminar os valores absolutos de  $\Delta e$  inferiores a 0,005 kPa.

Outra dificuldade ocorre quando a razão de Bowen se aproxima de -1,0 nos horários de inversão térmica (Sediyama, 1996), o que torna a expressão que calcula a evapotranspiração indeterminada. Valores de  $\beta$  em torno de -1 ocorrem no amanhecer e no pôr do Sol, quando a energia disponível para evaporação e demais fluxos é baixa e a taxa de variação de  $R_n$  é grande (Unland et al., 1996), como também no período noturno (Ortega-Farias et al., 1996). Payero et al.

(2003) verificaram fluxo de calor latente extremamente impreciso quando  $\beta \approx -1,0$ , conseguindo melhorar estas estimativas pela exclusão de dados no intervalo  $-1,25 < \beta < -0,75$ . Ortega-Farias et al. (1996) propõem que, para evitar erros graves nas estimativas dos fluxos, deve-se descartar dados de  $\beta < -0,75$ ; já Unland et al. (1996) adotaram como critério de qualidade dos dados excluir todos valores no intervalo  $|1+\beta| < 0,3$ . Para períodos de uma hora ou menos, nos quais não há dados confiáveis, os dados perdidos dos fluxos são substituídos por valores interpolados entre os anteriores e subsequentes (Unland et al., 1996).

Contudo, o BERB apresenta as vantagens de ser um método portátil, simples e relativamente preciso para estimar o fluxo vertical de calor latente (Silva et al., 2007; Soares et al., 2007; Allen et al., 2011); o método é capaz de estimar a evapotranspiração da cultura e, portanto, gerar coeficientes de cultivo consistentes (Inman-Bamber e Mcglinchey, 2003); não requisita dados sobre as características aerodinâmicas da superfície de interesse, pode estimar fluxos em pequenas escalas de tempo (menos que uma hora) e gerar medições contínuas (Todd et al., 2000). Outra vantagem é a adaptabilidade do método em condições de tempo severas (Fritschen e Fritschen, 2005), tais como tempestade de chuva e neve severas, grandes intervalos de temperatura do ar (-30 a 50°C) e umidade relativa do ar (0 a 100%). Zegaff et al. (2008) demonstraram que pelo método BERB foi possível executar um estudo da partição da evapotranspiração em evaporação do solo e transpiração de plantas de milho, sendo capaz de descrever os processos de troca de energia em nível de campo.

Tomando-se as devidas precauções na instalação do sistema de coleta de dados, bem como utilizando-se critérios para rejeitar dados inapropriados (Perez et al., 1999), o método apresenta resultados bastante consistentes.

## **2.4. Modelagem da evapotranspiração com sensoriamento remoto**

As tecnologias de balanço de energia desenvolvidas com imagens de satélite trouxeram possibilidade de aplicação em áreas extensas, sobre uma grande variedade de espécies vegetais e condições de disponibilidade de água (Allen et al., 2011). Os dados gerados por sensoriamento remoto são potencialmente úteis na legislação, planejamento e alocação de recursos hídricos, avaliação de impactos ambientais e avaliação do desempenho de sistemas de irrigação. Além disso, podem prover informações sobre uso da terra, dimensão de áreas irrigadas, desenvolvimento de biomassa, previsão de colheita, escoamento superficial e evapotranspiração (Bastiaanssen et al., 2000).

Allen et al. (2011) consideram que os métodos que determinam a ET a partir de imagens de satélite apresentam as vantagens de possibilitar a análise da variação espacial da ET, além de apresentarem menor custo, em comparação aos métodos pontuais de campo. Entretanto, advertem acerca de pixels das imagens de áreas de vegetação esparsa, como pequenos campos agrícolas, podem ser em verdade uma grande mistura de diferentes tipos vegetais e outras superfícies distintas, tornando sua interpretação difícil. O tempo de revisita dos satélites, especialmente daqueles de alta resolução espacial, muitas das vezes é grande, o que causa lacunas entre as estimativas da ET. A necessidade de imagens sem nuvens torna a utilização destes métodos pouco viável em locais costeiros, por exemplo.

O SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land é um método que utiliza relações empíricas e parametrizações físicas para determinar o fluxo de calor latente como resíduo da equação do balanço de energia (Bastiaanssen et al., 1998a e 1998b). O SEBAL requer poucos dados de superfície e com os

produtos gerados, possibilita a obtenção de mapas do saldo de radiação, dos fluxos não radiativos (G, H e LE) e da evapotranspiração. No SEBAL,  $R_n$  é computado pela reflectância registrada pelo sensor e pela temperatura da superfície; G é estimado a partir de  $R_n$ , da temperatura da superfície e de índices de vegetação; e H é estimado a partir de variações da temperatura da superfície, rugosidade da superfície e velocidade do vento, usando correções para o transporte de momentum e calor sensível.

O SEBAL emprega uma calibração interna utilizando modelagem inversa em condições extremas (Allen et al., 2011). Esta técnica envolve a calibração inversa do balanço de energia por meio do fluxo de calor sensível, em duas condições extremas (seca e úmida) na imagem de satélite. Tal calibração incorpora todos os desvios de estimativa de  $R_n$ , G e outros componentes intermediários, que são ocorrentes em quase todos os cálculos para estimativa e calibração de H baseados em dados de satélite. Os desvios são removidos por ocasião do cômputo da ET para milhões de pixels em uma imagem, por  $ET = R_n - G - H$ .

Courault et al. (2005) assinalam como vantagens do SEBAL a sua operacionalidade e não necessitar de correções atmosféricas no cálculo da temperatura da superfície. O SEBAL não requer o conhecimento prévio das culturas na superfície para gerar a evapotranspiração, que é computada em tempo real, englobando todos os aspectos de manejo, fitossanidade e heterogeneidade da cultura no campo. Como desvantagem do método, Gowda et al. (2008) citam a necessidade de adotar um pixel quente e um pixel frio na imagem, como procedimento para obter o fluxo de calor sensível. Segundo esses



autores, uma escolha inadequada destes pixels pode acarretar erros na estimativa espacial da evapotranspiração.

O SEBAL vem sendo amplamente aplicado em áreas agrícolas, com objetivo de determinar o consumo hídrico das culturas, bem como aplicar os resultados em diversas finalidades, tais como avaliação do uso da água, biomassa e produtividade das culturas, análise de impactos ambientais, entre outros. Bastiaanssen e Ali (2003) utilizaram a fração de evaporação gerada pelo SEBAL para determinar a biomassa de culturas; Ahmad et al. (2009) analisaram a adequabilidade de sistemas de irrigação também com a fração de evaporação; Bastiaanssen et al. (2001), Li et al. (2008), Immerzel et al. (2008), Karatas et al. (2009) entre outros aplicaram produtos do SEBAL na avaliação do uso de água pelas culturas.

Novas técnicas surgiram como alternativas de aperfeiçoamento do SEBAL. Tasumi (2003) sugeriu utilizar o aspecto/inclinação da superfície e correção atmosférica das reflectâncias das bandas espectrais no cálculo do albedo e Trezza (2002) trouxe mudanças na extrapolação da ET instantânea para valores diários. A partir de tais mudanças, desenvolveu-se o METRIC - Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (Allen et al., 2007). A transformação da ET instantânea, determinada para o momento da passagem do satélite, para a ET diária é efetuada no METRIC em função da Fração de Evapotranspiração de Referência –  $FET_r$ , que é obtida pela razão entre a ET instantânea e a ET de referência horária baseado na cultura da alfafa. No SEBAL, por sua vez, a extrapolação da ET para dados diários é dada pela Fração Evaporativa – FE, obtida pela razão entre LE instantâneo e a energia disponível instantânea ( $R_n - G$ ).

O SEBAL e o METRIC já foram aplicados e validados em várias regiões do mundo (Allen et al., 2005; Bastiaanssen et al., 2005; Silva e Bezerra, 2006; Kimura et al., 2007; Bezerra et al., 2008), sendo também utilizados para avaliar a precisão de demais métodos de estimativa da ET (Zwart et al., 2010; Senay et al., 2011). Utilizando diversos métodos para validação, Bastiaanssen et al. (1998b) concluíram que o SEBAL apresenta 95% de acurácia quando comparado à medidas diretas de fluxos ou balanço hídrico.

## **2.5. Produtividade de água**

A perda de água pelas plantas e a absorção de carbono, com consequente incremento de matéria seca, são processos que ocorrem pelo mesmo mecanismo: a regulação estomatal (Reichardt e Tim, 2004). Tanto esse fenômeno quanto o aumento da área foliar são influenciados pelo conteúdo de água no solo, considerando todas as demais condições para crescimento ótimas. Desta forma, a transferência de água por evapotranspiração é um fenômeno necessário ao crescimento das culturas.

O uso excessivo da água na irrigação ocorre quando o volume de água aplicado é superior ao necessário para a produção agrícola, considerando a lâmina necessária para a lixiviação de sais. Perdas na irrigação são minimizadas quando se usa a água na sua taxa de otimização, o que diminui os custos de captação e condução, contribuindo para aumentar a sustentabilidade da irrigação em áreas onde os recursos hídricos são limitados.

Tradicionalmente, as pesquisas na área agrícola tinham como foco principal maximizar a produção das culturas. Entretanto, nos últimos anos o foco

das pesquisas foi deslocado para os fatores limitantes nos sistemas de produção, notadamente a disponibilidade por área e água (Geerts e Raes, 2009). Atualmente, muitos trabalhos vêm sendo realizados aplicando-se índices de produtividade e uso de água para avaliar o manejo da irrigação e seu reflexo na produtividade das culturas (Ahmad et al., 2009; Karatas et al., 2009; Sakar et al., 2010; Zwart et al., 2010; Cai et al., 2011). Segundo Perry et al. (2009), tais estudos possibilitam avaliar os aspectos relativos ao manejo da irrigação e da cultura que aumentem o consumo “benéfico” da água, representado por taxas de transpiração que superem ou anulem taxas de evaporação ou perdas por percolação. Perry (2005) destacou a aplicabilidade do sensoriamento remoto orbital nestes estudos, pois permite traçar, pixel a pixel, a evolução da ET, o crescimento da cultura e a produtividade da água em todo o seu ciclo.

Li et al. (2008) esclarecem que o objetivo das técnicas que promovem redução no uso da água não é diminuir a produção das culturas, mas aumentar a produtividade de água. Os autores verificaram que a produtividade de água aumenta com a produção e, nem sempre máximas produções estão relacionadas com o máximo consumo de água.

A produtividade de água é definida pela produção líquida da agricultura, silvicultura, aquicultura ou pecuária, pela quantidade de água consumida para gerar esta produção. A produtividade agrícola da água (em inglês Crop Water Productivity – CWP) é determinada pela produção da cultura ou valores gerados pela produção dividida pela quantidade de água aplicada ou consumida pelas plantas (Ahmad et al., 2009; Teixeira et al., 2009b).

Estudos anteriores traziam a CWP como “eficiência do uso de água” (Zwart & Bastiaanssen, 2007). Perry et al. (2009) consideram que o termo

“eficiência” aplicada à avaliação do uso da água é carregado de juízo de valor, no qual entende-se que consumir menos é ser eficiente e poupar água. Ainda, segundo os autores, é necessário definir o que significa esta eficiência, especialmente no contexto ao qual é aplicada. Os mesmos exemplificam que perdas de água em um projeto de irrigação talvez não sejam perdas em nível da bacia hidrográfica, pois a água percolada ou extraviada por escoamento superficial pode retornar a aquíferos ou para rios, voltando ao ciclo de forma renovável. Tal fato não se verifica se a água for perdida para os oceanos.

Diante dos argumentos acima apresentados, Perry et al. (2009) sugerem a utilização do termo “uso de água”. Entre as vantagens desta terminologia, destaca-se a possibilidade de aplicá-la a qualquer escala sem precisar modificá-la, apresentar “valor-neutro”, podendo-se definir exatamente o que se considera um bom e um mau uso da água. Teixeira et al. (2009b) aplicaram aos seus estudos o termo “produtividade de água” - PA, por considerá-lo mais adequado em comparação do desempenho econômico da irrigação com outros usos da água.

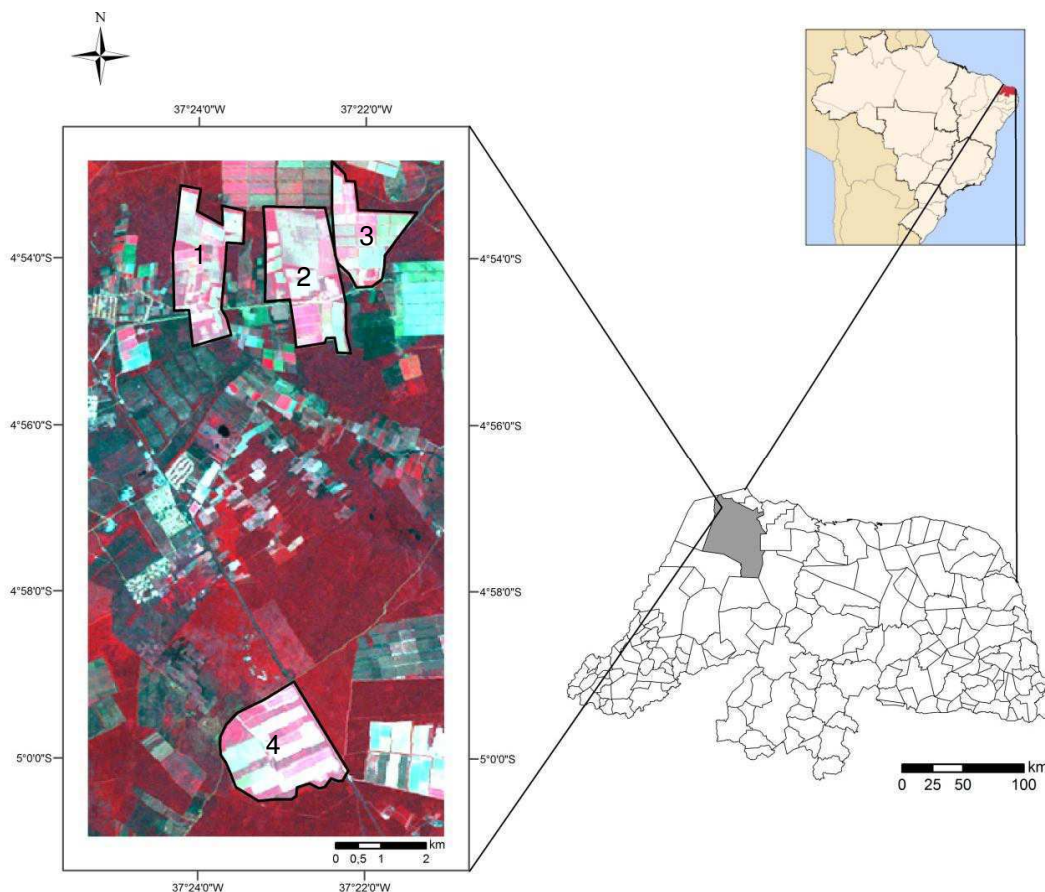
A PA é usualmente obtida dividindo-se a produção da cultura pela evapotranspiração da mesma (Renaut e Wallender, 2000; Immerzeel et al., 2008; Li et al., 2008; Zwart, 2010). Alguns autores recomendam determinar a produtividade de água utilizando-se a evapotranspiração, pois este termo inclui aporte de água além da irrigação, tal como chuva, elevação capilar e mudanças na umidade do solo (Teixeira et al., 2009b; Zwart et al., 2010).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Localização e caracterização da área de estudo**

A área de estudo desta pesquisa localiza-se no município de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte. A classificação climática da região segundo Koeppen é BSw<sub>h</sub> (Clima muito seco e quente, com precipitações no verão, atrasando para o outono), apresentando temperatura média de 27,4°C, pluviosidade média de 673,9 mm e umidade relativa média de 68,9% (Silva, M.C. et al., 2005).

O estudo da produtividade e uso da água na cultura do meloeiro compreendeu avaliações de quatro propriedades agrícolas pertencentes à CopyFrutas (Cooperativa dos Fruticultores da Bacia Potiguar), produtoras de melão para exportação. As fazendas e suas respectivas coordenadas da sede são: Fruta Vida (4°59'52" S; 37°23'09" W; 54 m), Norfruit (4°54'10" S; 37°22'01" O; 36 m), Brazil Melon (4°54'26" S; 37°23'02" W; 29 m) e Dinamarca (4°54'28" S; 37°24'06" W; 17 m). A localização do município de Mossoró e das fazendas avaliadas é mostrada na Figura 3.1.



**Figura 3.1.** Mapa do Rio Grande do Norte, destacando o município de Mossoró ao lado de recorte da área de interesse (imagem TM Landsat – 5 em composição RGB 4-3-2), com destaque para as propriedades avaliadas: 1: Dinamarca, 2: Brazil Melon, 3: Norfruit e 4: Fruta Vida.

O cultivo do melão é feito nestas propriedades em parcelas que variam de 2,5 a 5,0 ha. O escalonamento do plantio é semanal, de forma que possam ser realizadas colheitas também semanais, garantindo contínuo funcionamento do setor de pós-colheita (refrigeração e embalagem). Para escolher as parcelas avaliadas neste estudo, considerou-se aquelas em que todo o ciclo esteve contido no intervalo das imagens de satélite disponíveis. Características de cada parcela são descritas nas Tabelas 3.1 a 3.4.

**Tabela 3.1.** Descrição das parcelas avaliadas na Fazenda Dinamarca: área, variedade cultivada e datas de plantio, colheita, colocação e retirada da manta, no ano de 2009.

Nº	Área (ha)	Variedade	Espaçamento entre plantas (m)	Plantio	Colocação* da manta	Retirada da manta	Início da colheita
27	2,8	Gália	0,4 x 1,8	13/7	21/7	8/8	14/9
28	2,0	Cantaloupe	0,3 x 1,8	18/7	27/7	17/8	18/9
	0,5	Orange	0,3 x 1,8	18/7	27/7	17/8	18/9
19	3,0	Amarelo	0,4 x 1,8	27/7	4/8	24/8	6/10
26	2,5	Gália	0,4 x 1,8	27/7	3/8	24/8	28/9
29	2,0	Cantaloupe	0,3 x 1,8	1/8	10/8	31/8	5/10
	0,5	Orange	0,3 x 1,8	1/8	10/8	31/8	5/10
32	3,0	Amarelo	0,4 x 1,8	3/8	11/8	31/8	9/10
30	2,5	Gália	0,4 x 1,8	10/8	18/8	8/9	12/10
33	3,0	Amarelo	0,4 x 1,8	10/8	18/8	8/9	16/10
31	2,5	Gália	0,4 x 1,8	17/8	25/8	16/9	19/10

\* A colocação da manta ocorreu no dia do transplântio das mudas para o campo.

**Tabela 3.2.** Descrição das parcelas avaliadas na Fazenda Brazil Melon: área, variedade cultivada e datas de plantio, colheita, colocação e retirada da manta, no ano de 2009.

Nº	Área (ha)	Variedade	Espaçamento entre plantas (m)	Plantio	Colocação* da manta	Retirada da manta	Início da colheita
6	3,0	Gália	0,4 x 2,0	10/7	20/7	19/8	27/9
7	3,0	Gália/Amarelo	0,4 x 2,0	11/7	21/7	20/8	22/9
10	3,0	Gália	0,4 x 2,0	17/7	27/7	16/8	21/9
11	3,0	Cantaloupe	0,4 x 2,0	18/7	28/7	16/8	23/9
14	3,0	Amarelo/Gália	0,4 x 2,0	20/7	29/7	16/8	24/9
15	3,0	Gália	0,4 x 2,0	25/7	4/8	25/8	28/9
29	3,0	Amarelo	0,4 x 2,0	27/7	5/8	25/8	2/10
30	3,0	Gália	0,4 x 2,0	31/7	10/8	28/8	5/10
31	3,0	Cantaloupe	0,4 x 2,0	1/8	11/8	30/8	7/10
32	3,0	Amarelo	0,4 x 2,0	3/8	12/8	4/9	15/10
33	3,0	Amarelo	0,4 x 2,0	8/8	18/8	7/9	22/10
35	3,0	Cantaloupe	0,4 x 2,0	10/8	19/8	10/9	14/10
36	3,0	Gália	0,4 x 2,0	15/8	25/8	16/9	19/10

\* A colocação da manta ocorreu no dia do transplântio das mudas para o campo.

**Tabela 3.3.** Descrição das parcelas avaliadas na Fazenda Fruta Vida: área, variedade cultivada e datas de plantio, colheita, colocação e retirada da manta, no ano de 2009.

Nº	Área (ha)	Variedade	Espaçamento entre plantas (m)	Plantio*	Colocação da manta	Retirada da manta	Início da colheita
6	1,5	Amarelo	0,4 x 2,0	16/7	23/7	10/8	1/9
	1,5	Sancho	0,4 x 2,0	16/7	23/7	10/8	19/9
8	3,0	Sancho	0,4 x 2,0	23/7	30/7	19/8	28/9
34	3,0	Sancho	0,4 x 2,0	30/7	7/8	27/8	6/10
39	3,0	Medelín	0,4 x 2,0	5/8	13/8	31/8	15/10
40	3,0	Sancho	0,4 x 2,0	5/8	13/8	2/9	13/10
81	3,3	Medelín	0,4 x 2,0	12/8	19/8	10/9	19/10
	1,7	Sancho	0,4 x 2,0	13/8	19/8	10/9	19/10
78	3,3	Medelín	0,4 x 2,0	19/8	28/8	16/9	26/10
	1,7	Sancho	0,4 x 2,0	19/8	28/8	16/9	26/10

\*O plantio na Fruta Vida é feito com semeadura direta no campo.

**Tabela 3.4.** Descrição das parcelas avaliadas na Fazenda Norfruit: área, variedade cultivada e datas de plantio, colheita, colocação e retirada da manta, no ano de 2009.

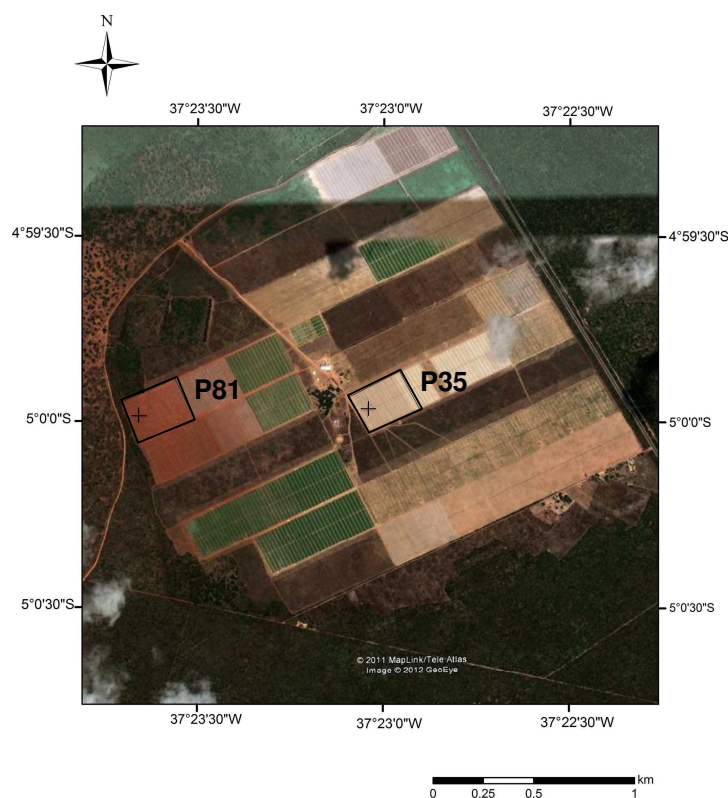
Nº	Área (ha)	Variedade	Espaçamento entre plantas (m)	Plantio	Colocação da manta*	Retirada da manta	Início da colheita
16	2,8	Cantaloupe	0,4 x 1,9	16/7	25/7	14/8	21/9
8	2,5	Amarelo	0,4 x 1,9	18/7	28/7	18/8	23/9
10	3	Gália	0,4 x 1,9	25/7	4/8	20/8	28/9
11	2,8	Amarelo	0,35 x 1,9	30/7	7/8	28/8	9/10
12	2,8	Cantaloupe	0,4 x 1,9	1/8	11/8	1/9	6/10
13	2,8	Amarelo/Gália	0,4 x 1,9	6/8	14/8	4/9	7/10
20	2,5	Gália	0,4 x 1,9	8/8	18/8	8/9	13/10
21	2,8	Gália	0,4 x 1,9	13/8	21/8	11/9	14/10
22	2,5	Gália/Cant.	0,4 x 1,9	14/8	24/8	14/9	19/10
23	2,8	Amarelo	0,35 x 1,9	15/8	26/8	15/9	23/10

\* A colocação da manta ocorreu no dia do transplantio das mudas para o campo.



### 3.2. Experimento de campo

O experimento de campo para determinação da evapotranspiração pelo BERB foi conduzido na Fazenda Fruta Vida, que possui cerca de 180 ha cultivados com melão das variedades ‘Sancho’, ‘Medelín’ e ‘Amarelo’. O experimento foi instalado em duas parcelas com a variedade ‘Sancho’ (Parcela 81 - P81 e Parcela 35 - P35), ambas com espaçamento de 2 m entre linhas de plantio 0,5 m entre plantas, cultivadas em leiras de 0,60 m de largura cobertas com filme de polietileno cinza. A figura 3.2 apresenta a localização das parcelas 81 e 35 na Fazenda Fruta Vida, bem como o local de instalação dos sensores, indicado por uma cruz.



**Figura 3.2.** Mapa construído a partir de imagem do programa “Google Earth” no qual são destacadas as parcelas P81 e P35 da Fazenda Fruta Vida, Mossoró – RN. O local de instalação dos sensores é indicado com uma cruz.

Cada parcela tinha 5,74 ha – 200 m na direção NO-SE e 287 m na direção NE-SO. Para conseguir *fetch* adequado, tomou-se o cuidado de instalar a torre micrometeorológica no sentido da direção predominante do vento (NE), nas proximidades do fim das parcelas, garantindo uma distância em linha reta satisfatória (230 m de bordadura). O solo das parcelas foi classificado como arenoso, por apresentar mais de 80% de areia nas profundidades de 0,0 a 0,2 m e 0,2 a 0,4 m.

A divisão do ciclo vegetativo do meloeiro foi feita em quatro estádios: inicial, crescimento vegetativo, médio (frutificação) e final (maturação). O estágio inicial tem duração de 18 a 25 dias, que vai desde a semeadura até a cobertura de 10% do solo pelas plantas; o estágio de crescimento vegetativo se estende até que 80% do solo estejam cobertos e dura, na Região Nordeste, de 18 a 22 dias; o estágio de frutificação compreende o período de surgimento dos frutos até a maturação, com 16 a 22 dias; e o estágio de maturação se estende desde a maturação dos frutos até a última colheita (Miranda et al., 2008). Na Tabela 3.5 apresentam-se as datas dos eventos que marcaram as mudanças dos estádios fisiológicos da cultura, bem como a duração dos mesmos nas parcelas avaliadas.

A emergência das plantas ocorreu sete dias após a semeadura, momento no qual foram instaladas as mantas brancas de polipropileno (TNT) sobre as leiras, procedimento este que tem por objetivo minimizar a incidência de pragas e doenças. O desenvolvimento da cultura foi monitorado por análise de crescimento, com coletas semanais de plantas, a partir dos 15 dias após semeadura – DAS, nas quais se determinou o índice de área foliar, por meio de um Integrador de Área Foliar Licor modelo 3100.

**Tabela 3.5.** Duração dos estádios de desenvolvimento do meloeiro cultivado na Fazenda Fruta Vida (Mossoró - RN), no período de agosto de 2009 a janeiro/2010.

Estádios	Eventos	Etapa 1 (2009) – P81		Etapa 2 (2009/2010)-P35	
		Datas	Duração do estádio (dias)	Datas	Duração do estádio (dias)
<b>Inicial</b>	Plantio	12/08		03/11	
	10% cobertura do solo	04/09	22	25/11	21
<b>Desenvolvimento</b>	80% cobertura do solo / começo da frutificação	23/09	19	13/12	18
<b>Médio</b>	Maturação dos frutos	11/10	18	04/01/2010	22
<b>Final</b>	Colheita	19/10	9	11/01/2010	8
<b>Total de dias</b>			68		69

O método de irrigação adotado em toda a fazenda é gotejamento, com emissores de vazão  $1,2 \text{ L h}^{-1}$ . O espaçamento dos emissores era  $0,5 \times 2,0 \text{ m}$ , de forma a ter um gotejador por planta. O turno de rega adotado é diário, sendo a lâmina de irrigação dividida em três aplicações durante o dia. A lâmina que foi aplicada em cada parcela é informada nas Tabelas 3.6 e 3.7. O total da irrigação na P81 foram  $325,20 \text{ mm}$ , o que equivaleu a  $3252 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e  $339,6 \text{ mm}$  na P35, ou seja,  $3396 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

**Tabela 3.6.** Lâmina de irrigação aplicada ao meloeiro cultivado na parcela 81 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), ano 2009.

<b>Datas</b>	<b>Eventos</b>	<b>Lâmina de irrigação (mm dia<sup>-1</sup>)</b>
12/agosto	Semeadura	2,4
13 a 18/agosto		1,2
19/agosto a 09/setembro	Plantas sob a manta	2,4
10/ a 17/setembro	Retirada da manta	4,8
18 e 19/ setembro	Início da frutificação	6,0
20 a 22/ setembro		7,2
23/ setembro a 10/outubro		8,4
11 e 12/ outubro		7,2
13 e 14/ outubro		6,0
15 e 16/ outubro	Maturação dos frutos	3,6
17 e 18/ outubro		2,4
19/ outubro	Colheita	1,2

**Tabela 3.7.** Lâmina de irrigação aplicada ao meloeiro cultivado na parcela 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), ano 2009/2010.

<b>Datas</b>	<b>Eventos</b>	<b>Lâmina de irrigação (mm dia<sup>-1</sup>)</b>
03/novembro	Semeadura	2,4
04 a 09/novembro		1,2
10 a 30/novembro	Plantas sob a manta	2,4
01 a 10/dezembro	Retirada da manta	4,8
11/dezembro a 03/janeiro	Início da frutificação	8,4
04 e 05/janeiro		7,2
06/janeiro		6,0
07/janeiro	Maturação dos frutos	3,6
08/janeiro		2,4
09 e 10/janeiro		1,2
11/janeiro	Colheita	1,2

### 3.3. Balanço de energia pelo Método da razão de Bowen

Os dados micrometeorológicos foram obtidos em duas épocas na safra 2009/2010: a primeira compreendendo o período de 12 de agosto a 20 de outubro e a segunda de 04 de novembro a 11 de janeiro de 2010. O fluxo de calor latente (LE) foi determinado pelo método da razão de Bowen (BERB), partindo da equação do balanço de energia (Bowen, 1926):

$$R_n = LE + H + G \quad (3.1)$$

Em que  $R_n$  é a radiação líquida à superfície, LE é o fluxo de calor latente, H é o fluxo de calor sensível e G é o fluxo de calor no solo, todos em  $W m^{-2}$ .

Com as medidas de  $R_n$  e G efetuadas em campo, obteve-se LE a partir da Razão de Bowen ( $\beta$ ):

$$LE = \frac{(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (3.2)$$

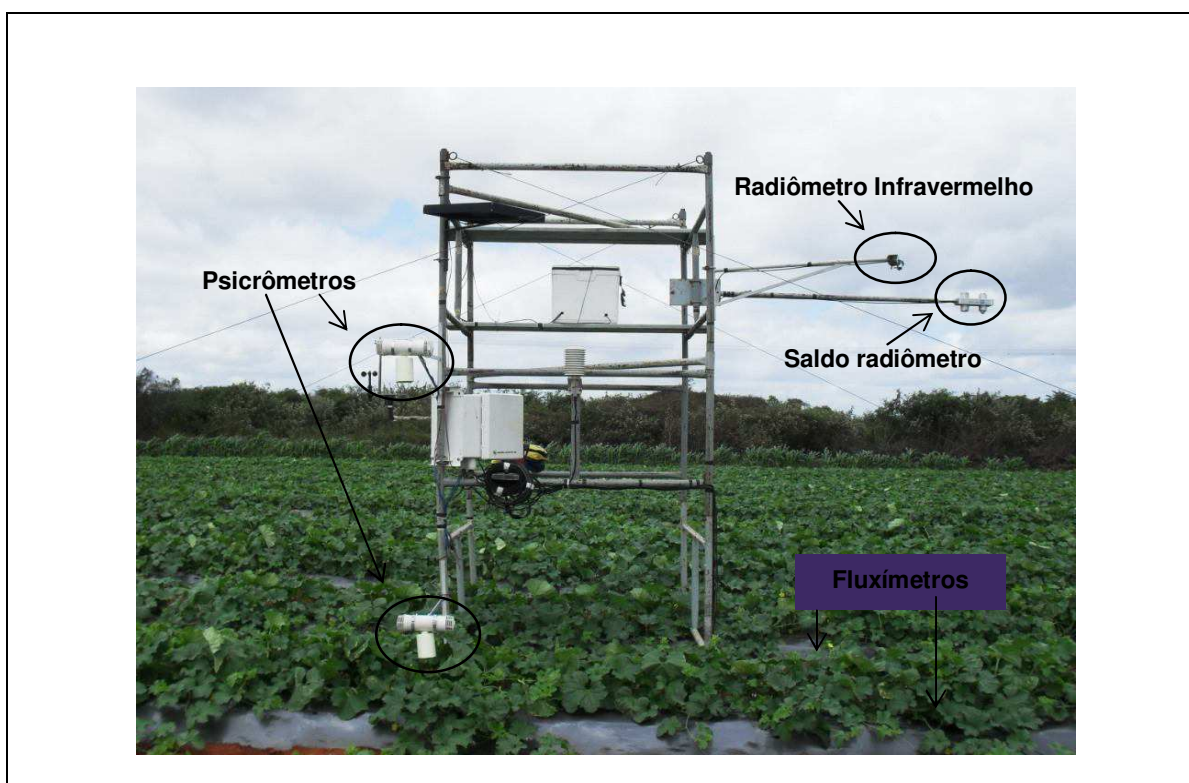
Assumindo que os coeficientes de difusão turbulenta para calor e vapor d'água são iguais,  $\beta$  é dado por:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (3.3)$$

Em que  $\gamma$  é o fator psicrométrico ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ),  $\Delta T$  é o gradiente vertical de temperatura ( $^\circ C$ ) e  $\Delta e$  é o gradiente vertical de pressão de vapor d'água ( $kPa$ ), ambos sobre o dossel da cultura.

De acordo com as recomendações de Perez et al. (1999), somente dados no período diurno foram considerados para os cálculos dos fluxos. Para medir o saldo de radiação, instalou-se um saldo-radiômetro (Kipp Zonen, modelo CNR1) a 2,20 m de altura. O fluxo de calor no solo foi determinado por duas placas (Hukseflux HFP01-L) enterradas a 0,02 m, uma sob o *mulch* na linha de plantio e

outra nas entrelinhas. Os fluxos verticais de temperatura e vapor d'água foram determinados a partir da medição das temperaturas de bulbo úmido e seco com termojunções de cobre-constantan em psicrômetros de ventilação forçada. Os psicrômetros foram instalados a 0,3 m ( $z_1$ ) e 1,8 m ( $z_2$ ) acima do dossel vegetal, os quais foram elevados à medida que a cultura se desenvolvia. Adicionalmente, instalou-se um radiômetro infravermelho Apogee SI – 111 para medir a temperatura da superfície, a 2,20 m de altura. Todos os dados foram armazenados em um sistema de aquisição de dados CR1000 da Campbell Scientific, Logan, EUA. A Figura 3.3 apresenta foto da torre com os instrumentos supracitados, instalados na Parcela 81.



**Figura 3.3.** Foto da área do experimento para determinação do BERB, indicando a posição dos sensores. Fazenda Fruta Vida, parcela 81, 16 de setembro de 2009.

Os termopares foram calibrados em ambiente fechado, sem incidência de radiação ou correntes de ar, imersos em um recipiente com água, tomando-se medidas a cada segundo durante 24 horas, no mesmo sistema de aquisição de dados que foi utilizado em campo. A diferença média entre os quatro termopares foi inferior a 0,1°C, com desvio padrão máximo de 0,2°C e  $R^2 > 0,99$  entre eles.

Os coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) foram determinados pela razão entre a evapotranspiração da cultura pelo método BERB ( $ET_{BERB}$ ) e a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), esta estimada a partir de dados coletados na estação meteorológica do INMET localizada na Fazenda Norfruit, a 10 km do local do experimento (5°4'54" S, 37°22'7" W, 36 m). A evapotranspiração de referência foi calculada segundo a equação da FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Indicadores de desempenho foram aplicados para comparar a  $ET_{BERB}$  com a evapotranspiração do melão determinada a partir de  $ET_0 \times K_c - ET_{FAO}$  - utilizando os valores de  $K_c$  para o meloeiro sugeridos por Allen et al. (1998) no Manual 56 da FAO para Irrigação e Drenagem. Os valores de  $K_{cFAO}$  foram ajustados para as condições de vento e umidade locais, bem como para o manejo da cultura com cobertura plástica no solo. Os seguintes indicadores foram utilizados: coeficiente de determinação da regressão linear,  $R^2$ ; razão média, RM (Eq. 3.4.); raiz quadrada do quadrado médio do erro, RQME (Eq. 3.5) e índice de concordância de Wilmott,  $d_w$  (Eq. 3.6)(Legates e McCabe Jr., 1999).

$$RM = \frac{ET_{CBERB}}{ET_{CFAO}} \quad (3.4)$$

$$RQME = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{CBERB_i} - ET_{CFAO_i})^2}{n} \right]^{0,5} \quad (3.5)$$

Em que  $n$  é o número de observações.

$$d_w = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{CBERBi} - ET_{CFAOi})^2}{\sum_{i=1}^n (|ET_{CBERBi} - \overline{ET_{CFAO}}| + |ET_{CFAOi} - \overline{ET_{CFAO}}|^2)} \right] \quad (3.6)$$

Em que  $\overline{ET_{CFAO}}$  é a média dos valores da evapotranspiração do meloeiro determinada segundo o método da FAO.

Os indicadores RM e RMQE possuem as mesmas unidades das variáveis, neste caso mm, sendo o RQME um parâmetro não-estatístico sem limite superior de valor. Valores de  $R^2$ ,  $d_w$  e RM em torno de 1 e valores de RQME tendendo a zero indicam boa concordância entre os métodos.

### **3.4. Balanço de energia e evapotranspiração pelo SEBAL**

#### **3.4.1. Imagens de satélite**

As imagens de satélite utilizadas foram geradas pelo Mapeador Temático do satélite Landsat 5 (TM - Landsat 5), órbita 216 e ponto 63, adquiridas com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Foram utilizadas cinco imagens, obtidas em datas distintas da safra 2009 de melão na região de estudo: 31 de julho (dia sequencial do ano - DSA 212), 16 de agosto (DSA 228), 01 de setembro (DSA 244), 17 de setembro (DSA 260) e 03 de outubro (DSA 276). Estas foram as imagens disponíveis para a aplicação do SEBAL, pois não apresentavam nuvens sobre a área de estudo. O Landsat 5 tem resolução temporal de 16 dias e o horário de passagem do satélite sobre a área de interesse ocorria sempre às 9 horas e 30 minutos (tempo local).

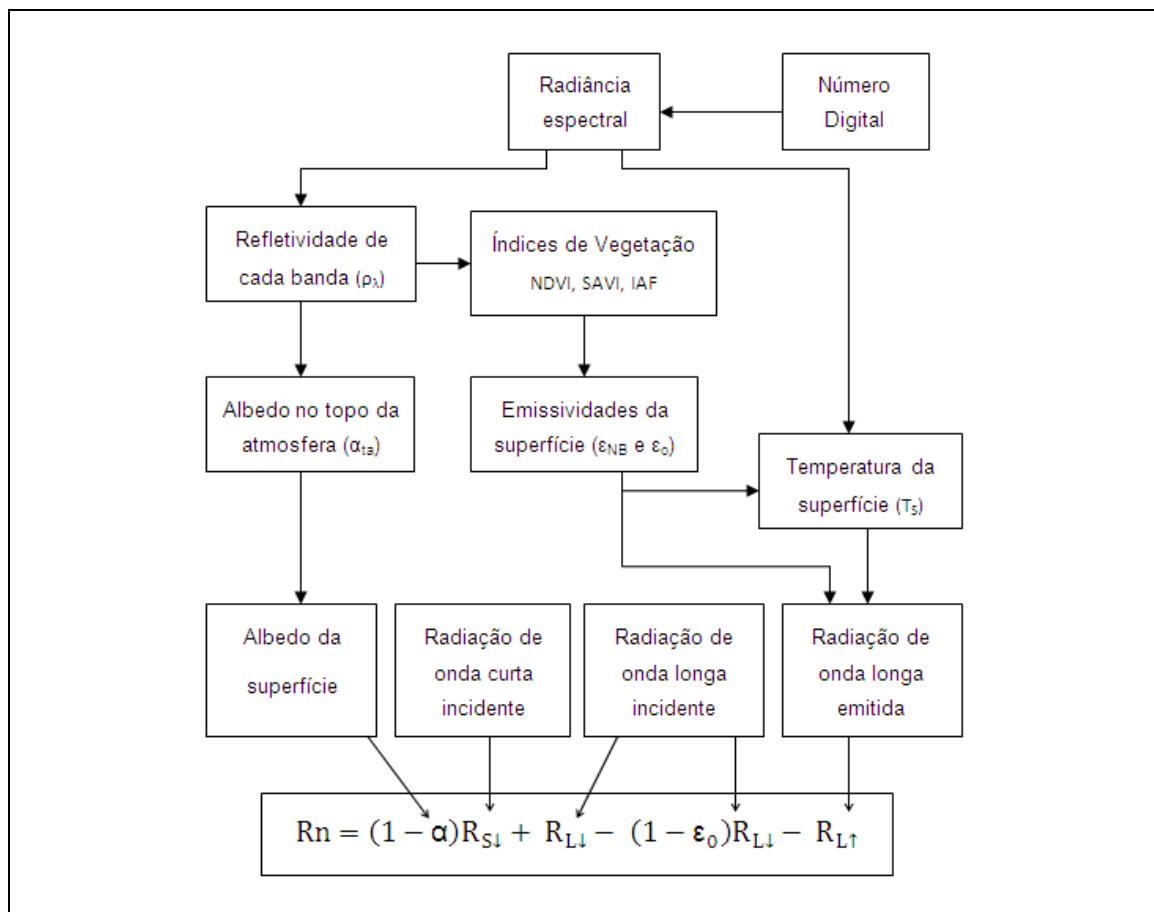
O sensor TM mede a radiância espectral dos alvos e armazena-os na forma de níveis de cinza, ou número digital (ND), cujos valores variam de 0 a 255 (8 bits),



tendo uma resolução espacial de 30 m x 30 m nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e resolução de 120 m x 120 m no canal termal, banda 6.

### 3.4.2. Balanço de radiação

O SEBAL requer imagens com canais refletivos na região do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio, e infravermelho termal, para determinação do albedo da superfície, índices de vegetação e temperatura da superfície, os quais são implementados no cômputo do saldo de radiação -  $R_n$  (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2002; Silva et al., 2011), conforme o esquema da Figura 3.3.



**Figura 3.4.** Esquema da obtenção do balanço de radiação à superfície a partir de imagens de satélite.

Primeiramente, os dados da imagem, que são Números Digitais – ND, foram convertidos em radiância espectral monocromática ( $L_\lambda$ ), obtida pela seguinte expressão (Markham e Baker, 1987):

$$L_\lambda = a_\lambda + \left( \frac{b_\lambda - a_\lambda}{255} \right) ND \quad (3.7)$$

Em que  $L_\lambda$  é a radiância espectral monocromática ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ),  $a_\lambda$  e  $b_\lambda$  são coeficientes de calibração espectral do sensor (Chander et al., 2007) e o subscrito “ $\lambda$ ” refere-se a cada banda espectral.

A etapa seguinte compreendeu o cômputo da reflectância de cada banda espectral –  $\rho_\lambda$ , de acordo com a seguinte equação (Allen et al., 2002):

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda}{K_\lambda \cos\theta d_r} \quad (3.8)$$

Em que  $L_\lambda$  é a radiância espectral,  $K_\lambda$  é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera,  $\cos\theta$  é o cosseno do ângulo de incidência dos raios solares com a normal à superfície (ângulo zenital) e  $d_r$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol. Como a superfície em questão é plana e horizontal, determinou-se o  $\cos\theta$  pela equação 3.10 (Allen et al., 2007).

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left( DSA \frac{2\pi}{365} \right) \quad (3.9)$$

Em que DSA é o dia sequencial do ano.

$$\cos\theta = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \quad (3.10)$$

Em que  $\delta$  é a declinação do Sol,  $\phi$  é a latitude central da cena e  $\omega$  é o ângulo horário (em radianos).

Por sua vez,  $\delta$  e  $\omega$  foram obtidos por (Allen et al., 1998):

$$\delta = 0,409 \sin\left(\text{DSA} \frac{2\pi}{365} - 1,39\right) \quad (3.11)$$

$$\omega = \frac{\pi}{12} \left[ \left( t + \frac{L_Z - L_M}{15} + S_c \right) - 12 \right] \quad (3.12)$$

Em que  $t$  é a hora de passagem do satélite,  $L_Z$  é a longitude da hora legal ( $45^\circ$ ),  $L_M$  é a longitude central da cena, e  $S_c$  é a correção sazonal para a hora solar dada pela seguinte expressão (Duffie e Beckman, 1991):

$$S_c = 0,1645 \sin\left[\frac{4\pi(\text{DSA}-81)}{364}\right] - 0,1255 \cos\left[\frac{2\pi(\text{DSA}-81)}{364}\right] - 0,025 \sin\left[\frac{2\pi(\text{DSA}-81)}{364}\right] \quad (3.13)$$

O albedo da superfície foi calculado a partir do albedo no topo da atmosfera (Eq.3.15), o qual integra as reflectâncias das bandas 1 a 5 e 7 usando coeficientes de ponderação (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2002).

$$\alpha_{\text{toa}} = \sum(\omega_\lambda \rho_\lambda) \quad (3.14)$$

Em que  $\alpha_{\text{toa}}$  é o albedo no topo da atmosfera,  $\rho_\lambda$  é a refletividade de cada banda e  $\omega_\lambda$  o seu respectivo coeficiente de ponderação no cômputo do albedo.

Para determinar o albedo da superfície ( $\alpha$ ), aplica-se uma correção utilizando a transmissividade atmosférica ( $\tau_{\text{sw}}$ ):

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha'}{\tau_{\text{sw}}^2} \quad (3.15)$$

Em que  $\alpha'$  é o albedo da atmosfera, ou seja, a porção de radiação que é refletida pela atmosfera antes de atingir a superfície e volta ao sensor a bordo do satélite. Valores de  $\alpha'$  variam de 0,025 a 0,04, sendo utilizado 0,03, por ser um valor médio comumente empregado em outros trabalhos (Allen et al., 2002; Silva et al., 2005a; Singh et al., 2008).

A transmissividade da atmosfera foi determinada segundo a seguinte equação (Allen et al., 2007):

$$\tau_{sw}=0,35+0,627 \exp \left[ \frac{-0,00146P}{K_t \cos \theta_{hor}} - 0,075 \left( \frac{W}{\cos \theta_{hor}} \right)^{0,4} \right] \quad (3.16)$$

Em que P é a pressão atmosférica local, kPa (Eq.3.18),  $K_t$  é o coeficiente de turbidez do ar ( $K_t = 1,0$  para ar limpo e  $K_t = 0,5$  para ar extremamente túrbido ou poluído, sendo utilizado  $K_t = 1,0$  neste trabalho),  $\theta_{hor}$  é o ângulo zenital do sol sobre uma superfície plana e horizontal (Eq. 3.9) e W é a água precipitável, dada pela equação 3.18.

$$P=101,3 \left( \frac{T_a-0,0065z}{T_a} \right)^{5,26} \quad (3.17)$$

Em que  $T_a$  é a temperatura do ar (K) e z é a elevação de cada pixel acima do nível do mar. Utiliza-se imagens de Modelo de Elevação Digital – MED para superfícies que não sejam planas.

$$W = 0,14 e_a P + 2,1 \quad (3.18)$$

Em que  $e_a$  é a pressão atual do vapor (kPa).

Na implementação do SEBAL são determinados três índices de vegetação. O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – IVDN (Rouse et al., 1974) é calculado tomando-se as reflectâncias do vermelho ( $\rho_3$ ) e do infravermelho próximo ( $\rho_4$ ).

$$IVDN = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (3.19)$$

Para eliminar os efeitos de fundo da reflexão do solo, especialmente devido à umidade, utiliza-se o Índice de Vegetação Ajustado para os efeitos do Solo (IVAS), o qual também utiliza as reflectâncias do vermelho e do infravermelho próximo, calculado pela seguinte equação (Huete, 1988):

$$IVAS = (1+L) \frac{\rho_4 - \rho_3}{(L - \rho_4 + \rho_3)} \quad (3.20)$$

Em que L é o fator de ajuste do IVAS, utilizado neste estudo o valor de 0,1, conforme recomendação de outros autores (Allen et al., 2002; Borges et al, 2010; Silva et al., 2011).

De posse do IVAS, obteve-se o Índice de Área Foliar, definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área de solo ocupado. O IAF foi calculado através da equação proposta por Allen et al.(2002):

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - IVAS}{0,59}\right)}{0,91} \quad (3.21)$$

A temperatura da superfície é computada utilizando-se a equação de Planck invertida, válida para um corpo negro. No entanto, como cada pixel não se comporta como um corpo negro é preciso estabelecer a emissividade de cada um no domínio espectral da banda termal (10,4 - 12,5  $\mu\text{m}$ ),  $\epsilon_{NB}$ . Da mesma forma, no cômputo da radiação de onda longa emitida pela superfície, deve-se incluir a emissividade de banda larga (5 - 50  $\mu\text{m}$ ),  $\epsilon_0$ .  $\epsilon_{NB}$  e  $\epsilon_0$  são determinados por (Allen et al., 2002):

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,033 \quad IAF \quad (3.22)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \quad IAF \quad (3.23)$$

Em pixels com  $IAF \geq 3$ ,  $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$ . Para corpos de água ( $NDVI < 0$ ) foram utilizados os valores de  $\epsilon_{NB} = 0,99$  e  $\epsilon_0 = 0,985$ , conforme Allen et al. (2002).

Para a obtenção da temperatura da superfície ( $T_s$ ), em Kelvin, utiliza-se a radiância espectral da banda termal  $L_{\lambda 6}$  e a emissividade  $\epsilon_{NB}$ , pela seguinte equação (Markham & Baker, 1987):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (3.24)$$

Em que  $K_1 = 607,76 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$  e  $K_2 = 1260,56 \text{ K}$  são constantes de radiação ajustadas à banda termal do TM - Landsat 5.

Após determinação das emissividades e da temperatura da superfície, procedeu-se aos cálculos dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa. A radiação de onda longa emitida por cada pixel ( $R_{L\uparrow}$ , em  $\text{W m}^{-2}$ ) foi computada mediante a equação de Stefan-Boltzman:

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (3.25)$$

Em que  $\epsilon_0$  é a emissividade de cada pixel;  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ;  $T_s$  é a temperatura da superfície, em Kelvin.

A radiação de onda longa incidente ( $R_{L\downarrow}$ ) também foi computada, pela equação de Stefan-Boltzman, como segue:

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (3.26)$$

Em que  $T_a$  - temperatura do ar, medida na estação meteorológica do INMET localizada na Fazenda Norfruit e  $\epsilon_a$  - emissividade da atmosfera, calculada pela equação 3.28, utilizando coeficientes obtidos por Lucena (2010) para a região de Quixeré, CE.

$$\epsilon_a = 0,9565 (\ln \tau_{sw})^{0,1004} \quad (3.27)$$

Em que  $\tau_{sw}$  é a transmissividade da atmosfera, dada pela equação 3.16.

O fluxo incidente de radiação de onda curta à superfície evaporante ( $R_{S\downarrow}$ ) foi determinado segundo Allen et al. (2002):

$$R_{S\downarrow} = S \cos\theta d_r \tau_{sw} \quad (3.28)$$

Em que: S é a constante solar ( $1367 \text{ W m}^{-2}$ ) e  $\tau_{sw}$  já definida anteriormente.

Por fim, o saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) foi computado, pixel a pixel, pela seguinte equação:

$$R_n = (1 - \alpha) R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (3.29)$$

### 3.4.3. Balanço de energia e evapotranspiração

#### 3.4.3.1. Fluxo de calor no solo (G)

O fluxo de calor no solo - G ( $\text{W m}^{-2}$ ) foi obtido segundo equação apresentada por Bastiaanssen (2000), que leva em consideração o albedo e o grau de cobertura vegetal da superfície.

$$\frac{G}{R_n} = T_S (0,0038 + 0,0074\alpha)(1 - 0,98 \text{IVDN}^4) \quad (3.30)$$

Para corpos d'água, nos quais  $\text{NDVI} < 0$ , assume-se que  $G = 0,3R_n$  (SILVA et al., 2011).

#### 3.4.3.2. Fluxo de calor sensível (H)

A estimativa de H é o principal procedimento do SEBAL. Trata-se de um processo iterativo, onde se considera, inicialmente, a atmosfera em equilíbrio neutro e, posteriormente, é identificada a condição de estabilidade e realizadas as correções necessárias. O termo H foi estimado com base na velocidade do vento,

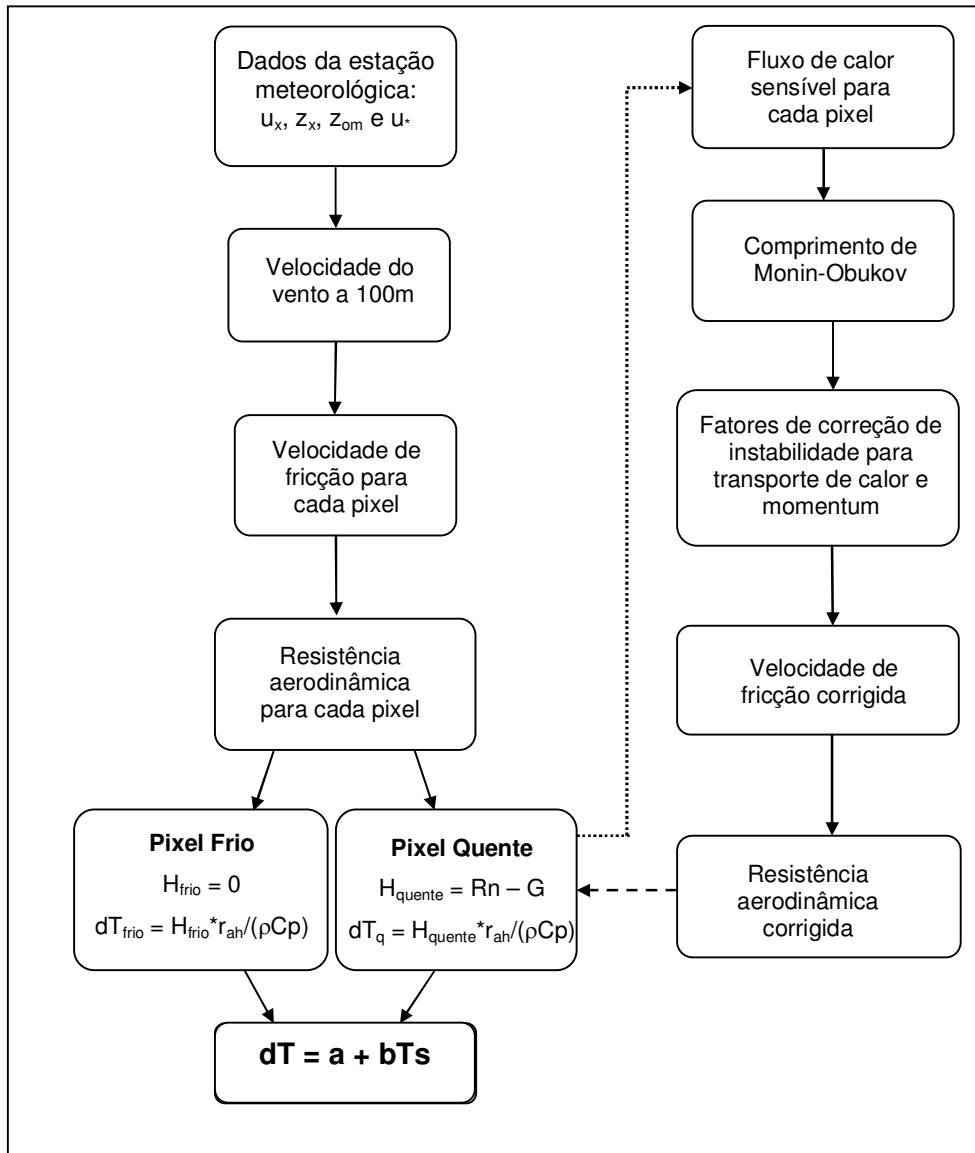
velocidade de fricção e temperatura da superfície, usando-se uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis próximos à superfície (Bastiaanssen et al., 1998a). A Figura 3.5 traz o esquema do processo iterativo para determinação de H.

Matematicamente, o fluxo de calor sensível pode ser calculado pela seguinte equação para o transporte de calor:

$$H = \frac{\rho C_p dT}{r_{ah}} \quad (3.31)$$

Em que  $\rho$  é a densidade do ar úmido ( $\text{kg m}^{-3}$ ), calculada segundo Arya (1988);  $C_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $dT$  é a diferença de temperatura entre dois níveis próximos à superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $\text{s m}^{-1}$ ).





**Figura 3.5.** Processo iterativo para cômputo do fluxo de calor sensível no SEBAL. Adaptado de Allen et al. (2002).

Primeiramente, tomou-se os dados registrados na estação meteorológica para determinar  $r_{ah}$ , iniciando pelo cálculo do coeficiente de rugosidade ao transporte de momentum ( $Z_{0m}$ ), utilizando a altura da vegetação na área da estação meteorológica local ( $h$ ):

$$Z_{0m} = 0,12h \quad (3.32)$$

Considerando a atmosfera neutra, calculou-se a velocidade de fricção para o local da estação meteorológica de acordo com o perfil logaritmo do vento:

$$u^* = \frac{k u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad (3.33)$$

Em que  $k$  é a constante de von Karman (0,41) e  $u_x$ : velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) na altura  $z_x$  (10 m).

Em seguida, computou-se a velocidade do vento para o nível de 100 m acima da superfície, altura na qual a velocidade pode ser considerada constante, em virtude da influência da rugosidade da superfície sob o fluxo de ar ser desprezível.

$$u_{100} = u^* \frac{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)}{k} \quad (3.34)$$

Considerada constante para toda cena, a velocidade do vento a 100 m foi utilizada para determinar, pixel a pixel a velocidade de fricção e a resistência aerodinâmica ao fluxo de calor, conforme as equações 3.35 e 3.37, respectivamente.

$$u^* = \frac{k u_{100}}{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)} \quad (3.35)$$

Em que  $z_{0m}$  (m) é computado para cada pixel em função do IVAS (Índice de Vegetação Ajustado para o Solo), segundo equação 3.37 (Bastiaanssen, 2000).

$$z_{0m} = \exp(-5,809 + 5,62 \text{ IVAS}) \quad (3.36)$$

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^* k} \quad (3.37)$$

Em que  $z_1$  e  $z_2$  são alturas acima da superfície, neste estudo consideradas  $z_1 = 0,1$  m e  $z_2 = 2,0$  m e  $k$  é a constante de von Karman (0,41).

A diferença de temperatura do ar entre dois níveis próximos e acima da superfície ( $dT$ ) é determinada no SEBAL por meio de uma relação linear com a temperatura da superfície ( $T_s$ ):

$$\Delta T = a + bT_s \quad (3.38)$$

Em que:  $a$  e  $b$  são coeficientes da relação linear obtidos através dos pixels “âncoras” (“pixel frio” e “pixel quente”).

Para determinar os coeficientes  $a$  e  $b$  desta equação, Bastianssen et al. (1998a) propuseram a utilização de dois “pixel-âncora”, denominados “pixel frio” e “pixel quente”. O pixel frio foi escolhido neste estudo em uma área bem irrigada com vegetação em pleno desenvolvimento, onde se assumiu que o fluxo de calor sensível é nulo ( $H_{frio} = 0$ ) e o fluxo de calor latente ( $LE_{frio}$ ) dado por  $R_n - G$ . O pixel quente foi escolhido em uma área de solo exposto e seco, admitindo-se fluxo de calor latente nulo ( $LE_{quente} = 0$ ) e o calor sensível  $H_{quente}$  dado por:

$$H_{quente} = R_n - G = \frac{\rho c_p (a + bT_s)}{r_{ah}} \quad (3.39)$$

Em que  $T_s$ ,  $R_n$ ,  $G$  e  $r_{ah}$ , já definidos anteriormente, são obtidos no pixel quente da imagem.

Neste ponto, conhecendo-se os valores de  $T_s$ ,  $R_n$ ,  $G$ ,  $C_p$ ,  $\rho$  e  $r_{ah}$  para o pixel quente, tem-se que:

$$a + bT_s = r_{ah} (R_n - G) / (\rho c_p) \quad (3.40)$$

Como no pixel frio  $dT = 0$ , ou seja,  $a = bT_s = 0$ , tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, o que possibilita o cálculo de  $a$  e  $b$ . Na sequência pode-se então obter  $H$ , segundo a equação 3.31, pixel a pixel.

Os valores de calor sensível obtidos nesta etapa não representam adequadamente o fluxo em cada pixel, visto que as equações utilizadas foram desenvolvidas para condições de neutralidade na atmosfera. Estes primeiros valores constituem o início do processo iterativo que promoveu o ajuste dos mesmos identificando, nas etapas seguintes, a condição de estabilidade de cada pixel. Para tal, utilizou-se a teoria da similaridade de Monin-Obukov para corrigir a estabilidade para transporte de momentum ( $\Psi_m$ ) e de calor sensível ( $\Psi_h$ ), os quais são empregados na determinação de  $u^*$  e  $r_{ah}$  corrigidos.

O comprimento de Monin-Obukhov –  $L$  (m) foi calculado pela seguinte expressão (Allen et al., 2002):

$$L = \frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{k g H} \quad (3.41)$$

Na qual  $\rho$  é a densidade do ar úmido ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $c_p$  é a calor específico do ar à pressão constante ( $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $u_*$  é a velocidade de fricção ( $\text{m.s}^{-1}$ ) em cada pixel,  $T_s$  é a temperatura da superfície (K) em cada pixel,  $g$ : módulo do campo gravitacional terrestre ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ ) e  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ) em cada pixel, obtido inicialmente considerando condição de neutralidade.

Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum ( $\Psi_m$ ) e de calor ( $\Psi_h$ ) foram considerados. Para isto, utilizou-se as formulações (Allen et al., 2002) apresentadas a seguir.

Se  $L < 0$  (condição de instabilidade):

$$\Psi_{m(100m)} = 2\ln\left(\frac{1+x_{(100m)}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x_{(100m)}^2}{2}\right) - 2\text{ARCTAN}(x_{(100m)}) + 0,5\pi \quad (3.42)$$

$$\Psi_{h(2m)} = 2\ln\left(\frac{1+x_{(2m)}^2}{2}\right) \quad (3.43a)$$

$$\Psi_{h(0,1m)} = 2\ln\left(\frac{1+x_{(0,1m)}^2}{2}\right) \quad (3.43b)$$

$$x_{(100m)} = \left(1 - 16 \cdot \frac{100}{L}\right)^{0,25} \quad (3.44a)$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \cdot \frac{2}{L}\right)^{0,25} \quad (3.44b)$$

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \cdot \frac{0,1}{L}\right)^{0,25} \quad (3.44c)$$

Se  $L > 0$  (condição de estabilidade):

$$\Psi_{(100m)} = -5 \left(\frac{100}{L}\right) \quad (3.45a)$$

$$\Psi_{(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L}\right) \quad (3.45b)$$

$$\Psi_{(0,1m)} = -5 \left(\frac{0,1}{L}\right) \quad (3.45c)$$

Se  $L = 0$  (condição de neutralidade),  $\Psi_m = 0$  e  $\Psi_h = 0$ .

O valor corrigido para a velocidade de fricção  $u_*$  ( $m s^{-1}$ ), computado em cada interação, é dado por:

$$u_* = \frac{u_{100} k}{\ln \frac{100}{z_{0m}} - \Psi_{m(100m)}} \quad (3.47)$$

Em que  $u_{100}$  é a velocidade do vento a 100 m ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $k$  é a constante de von Karman (0,41),  $z_{0m}$  é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e  $\Psi_{m(100m)}$  é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 100 m.

Com  $u_*$  retificado, calculou-se o valor corrigido da resistência aerodinâmica ao transporte de calor -  $r_{ah}$  ( $\text{s m}^{-1}$ ) por meio da seguinte equação (Allen et al., 2002):

$$r_{ah} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_1} - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}}{u_* k} \quad (3.48)$$

Em que  $z_2 = 2,0$  m,  $z_1 = 0,1$  m e  $\Psi_{h(z_2)}$  e  $\Psi_{h(z_1)}$  são as correções de estabilidade para o transporte de calor a 2,0 m e 0,1 m, respectivamente.

Com os novos valores de  $r_{ah}$  e  $u_*$  retornou-se ao cálculo da função da diferença de temperatura, repetindo todo o procedimento, como mostra o fluxograma da Figura 3.4. As iterações foram realizadas até que  $dT$  e  $r_{ah}$  convergiram para valores constantes no pixel quente.

### 3.4.3.3. Fluxo de calor latente (LE) e evapotranspiração

O fluxo de calor latente LE ( $\text{W m}^{-2}$ ) foi obtido como parte residual da equação do balanço de energia, tomando-se os valores instantâneos dos fluxos de calor no solo e sensível e do saldo de radiação:

$$LE = R_n - G - H \quad (3.49)$$

A evapotranspiração diária é obtida no SEBAL a partir da fração de evaporação (Equação 3.50) calculada para o momento da passagem do satélite, considerando-a constante para todo o dia (Bastiaanssen, 2000).

$$\Lambda = \frac{LE}{R_n - G} \quad (3.50)$$

A fração de evaporação é então multiplicada pelo saldo de radiação diário ( $R_{n24}$ ), obtendo-se a evapotranspiração para o mesmo período.

$$ET_{SEBAL\_24} = \frac{86.400 \Lambda R_{n24}}{\lambda} \quad (3.51)$$

Em que  $\lambda$  é o calor latente de evaporação da água,  $2,45 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$  e  $R_{n24}$  em  $\text{W m}^{-2}$ .

O saldo de radiação diário foi determinado a partir de uma relação linear com a radiação de onda curta incidente no dia, corrigida pela transmissividade da atmosfera (De Bruin e Stricker, 2000):

$$R_{n24} = (1 - \alpha) R_g - a \frac{R_g}{R_a} \quad (3.52)$$

Em que  $\alpha$  é o albedo da superfície, para cada pixel,  $R_g$  é a radiação de onda curta incidente na superfície e  $R_a$  é a radiação no topo da atmosfera, ambas em  $\text{W m}^{-2}$  para o período de 24 horas. Para o fator  $a$  utilizou-se o valor de 143 (Teixeira et al., 2008b).

Para determinar a ET sazonal, ou seja, para todo o ciclo produtivo, considera-se que a relação ( $ET_{SEBAL\_24} / ET_{0\_24}$ ) obtida no momento da passagem do satélite pode ser constante para um determinado período (Allen et al, 2007). Multiplicando esta razão pela  $ET_0$  acumulada no mesmo período, tem-se a

evapotranspiração real acumulada neste espaço de dias (Eq. 3.53). Somando-se as  $ET_{\text{período}}$  calculadas durante o ciclo da cultura, tem-se a evapotranspiração total do meloeiro (Eq. 3.54).

$$ET_{\text{período}} = \left( \frac{ET_{\text{SEBAL}_{24}}}{ET_{0_{24}}} \right) ET_{0_{\text{período}}} \quad (3.53)$$

Em que  $ET_{0_{\text{período}}}$  é o somatório da evapotranspiração diária de referência para o período considerado, determinada pela equação FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), com os dados da estação meteorológica do INMET, localizada na Fazenda Pau Branco.

$$ET_{\text{sazonal}} = \sum ET_{\text{período}} \quad (3.54)$$

Na determinação dos períodos de mesma relação ( $ET_{\text{SEBAL}_{24}}/ET_{0_{24}}$ ), considerou-se as datas de plantio ou transplântio das parcelas, bem como significantes mudanças na superfície imageada, especificamente referente à colocação e retirada das mantas.

### 3.5. Produtividade e uso da água

A produtividade da água foi determinada tanto com base no total de água aplicada como consumida pela cultura em todo ciclo (Eq. 3.55 e Eq. 3.56, respectivamente). Os dados de produção e irrigação de cada parcela das propriedades avaliadas foram obtidos junto aos administradores das mesmas.

$$PA_{\text{IR}} = \frac{\text{Prod}}{I_{\text{período}}} \quad (3.55)$$



$$PA_{ET} = \frac{\text{Prod}}{ET_{\text{período}}} \quad (3.56)$$

Em que PA é a produtividade de água ( $\text{kg m}^{-3}$ ) com base no total de água aplicada à cultura (subscrito “IR”) ou com base no total de água consumida pela cultura (subscrito “ET”), Prod é o valor da produção de melão (kg),  $I_{\text{período}}$  é a lâmina de irrigação aplicada à cultura em todo ciclo ( $\text{m}^3$ ) e  $ET_{\text{período}}$  é a evapotranspiração total da cultura ( $\text{m}^3$ ), determinada por meio do SEBAL.

Na área de interesse deste trabalho o turno de rega é diário, inclusive com aplicações fracionadas durante o dia. O solo na região das raízes é, portanto, mantido úmido. Nesta condição, contribuições por ascensão capilar são praticamente inexistentes, e mudanças na umidade do solo pouco acentuadas, considerando ainda que o estudo foi conduzido em período de poucas precipitações. Portanto, é pertinente empregar a produtividade de água em termos do volume aplicado por planta, o que possibilita avaliar as perdas por transporte (da captação à parcela irrigada) e percolação, quando comparado ao consumo da cultura (evapotranspiração).

Nas quatro propriedades, a irrigação é realizada em sistema de gotejamento, aplicando-se os fertilizantes por esta via. Informações sobre vazão e espaçamento dos gotejadores são fornecidas na Tabela 3.8. O manejo da irrigação é feito de forma empírica, baseado em uma tabela praticamente fixa, na qual cada produtor definiu determinada quantidade de água que deve ser aplicada em cada fase da cultura. Estes valores mudam apenas quando há muita presença de nuvens ou precipitação no dia em questão. Durante o período de uso da manta a lâmina é praticamente constante e passa a ser aumentada continuamente a partir do dia de sua retirada. A máxima lâmina é aplicada no período de formação dos

frutos, até quando eles atingem o tamanho ideal. Durante a fase de maturação, a água aplicada vai diminuindo gradativamente até a colheita.

**Tabela 3.8.** Vazão e espaçamento dos gotejadores utilizados no sistema de irrigação das propriedades avaliadas.

Propriedade	Variedade	Vazão do gotejador (L h <sup>-1</sup> )	Espaçamento entre gotejadores (m)
	Sancho	1,6	0,3 x 1,8
	Cantaloupe	1,6	0,3 x 1,8
Dinamarca	Orange	1,6	0,3 x 1,8
	Amarelo	1,6	0,4 x 1,8
	Gália	1,6	0,4 x 1,8
Brazil Melon	Todas	1,7	0,4 x 2,0
Fruta Vida	Todas	1,2	0,5 x 2,0
Norfruit	Todas	1,8	0,3 x 1,9

Índices de desempenho do sistema de irrigação foram implementados para avaliar o uso da água nas propriedades segundo Bos (1997), Bastiaanssen et al. (2001) e Karatas et al. (2009). A Razão de Consumo Total (RCT – Eq. 3.57) quantifica a fração do volume aplicado por irrigação que é evapotranspirado pela cultura, considerando que não há déficit hídrico.

$$RCT = \frac{ET_p - P_e}{V_c} \quad (3.57)$$

Em que  $ET_p$  é a evapotranspiração potencial (mm), sendo aqui aplicada a  $ET_0$ ;  $P_e$  é a precipitação efetiva e  $V_c$  é o volume de água aplicado (mm). A  $P_e$  foi determinada segunda a equação empírica da FAO (Brouwer e Heibloem, 1986) para climas subúmidos a áridos, considerando a declividade do terreno entre 4 a 5%:

$$P_e = 0,8P - 25, \text{ para } P_t > 75 \text{ mm} \quad (3.58)$$

$$P_e = 0,6P - 10, \text{ para } P_t \leq 75 \text{ mm}$$

Em que  $P_t$  é a precipitação total, em mm.

O Suprimento Hídrico Relativo (SHR – Eq. 3.59) indica a adequabilidade do sistema de irrigação à demanda hídrica.

$$SHR = \frac{V_c + P_t}{ET_p} \quad (3.59)$$

Em que  $P_t$  é a precipitação total, em mm.

A Fração de Uso da Água (FUA – Eq.3.60) é a porção de água no sistema que é efetivamente utilizada no crescimento das plantas, pelo processo da evapotranspiração. A FUA mostra mudanças no uso da água pela cultura e também indica quanto de água aplicada não é utilizado pelas plantas, sendo perdido por processos de evaporação, percolação ou escoamento superficial.

$$FUA = \frac{ET_c}{V_c + P_b} \quad (3.60)$$

Em que  $ET_c$  é a evapotranspiração da cultura (mm), determinada pelo SEBAL.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Observações de campo**

#### **4.1.1. Condições meteorológicas registradas na área estudada**

Durante o período estudado, as médias diárias de temperatura do ar ( $T_a$ ) e umidade relativa (UR), medidas na área experimental, não sofreram muitas alterações, conforme se apresenta nas Tabelas 4.1 e 4.2. A  $T_a$  variou de 25,04 (mês de agosto) a 26,84°C (mês de dezembro), enquanto que a UR foi de 67,41% em novembro a 74,64 em janeiro de 2010. Nos demais estádios, o valor de UR oscilou entre 71 e 73%. Nas mesmas tabelas, verifica-se que a velocidade do vento foi maior nos estádios fenológicos 1 e 2 da cultura na parcela 35 ( $> 3,0 \text{ m s}^{-2}$ ), referentes aos meses de novembro e dezembro, coincidindo com menores valores de UR registrados.

A radiação solar global ( $R_g$ ) pouco variou entre os meses de agosto a novembro (entre 21,60 e 23,34  $\text{MJ m}^{-2}$ ) seguindo a tendência da radiação solar no topo da atmosfera ( $R_a$ ). Entretanto, no último estágio fenológico da etapa 2, ocorrente no mês de janeiro, a média de  $R_g$  foi a menor registrada (17,94  $\text{MJ m}^{-2}$ ). Esta redução deve-se ao aumento da nebulosidade a partir do mês de dezembro. Valores da transmissividade atmosférica ( $\tau$ ) diária, determinada pela razão  $R_g/R_a$ , comprovam o aumento da nebulosidade, pois  $\tau$  esteve praticamente

constante desde agosto de 2009 e decresceu em dezembro, com valor de 0,47 em janeiro de 2010.

**Tabela 4.1.** Médias diárias dos elementos meteorológicos em cada estágio fenológico da cultura, registrados na área experimental durante a Etapa 1 (12 de agosto a 19 de outubro de 2009).

<b>Estádio fenológico</b>	<b>Período</b>	<b>Ta (°C)</b>	<b>UR (%)</b>	<b>u<sub>2</sub> (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Rg (MJ m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Ra</b>	<b>τ</b>
1	12/08 a 04/09	25,04	73,33	2,08	21,60	35,12	0,61
2	05 a 23/09	25,67	71,76	2,68	22,99	36,70	0,63
3	24/09 a 11/10	25,64	71,29	2,76	24,21	37,71	0,64
4	12 a 19/10	25,54	72,68	2,67	24,34	38,08	0,64

Ta: temperatura do ar, UR: umidade relativa do ar, u<sub>2</sub>: velocidade do vento a 2 m de altura, Rg: radiação solar global, Ra: radiação solar no topo da atmosfera e τ: transmissividade atmosférica.

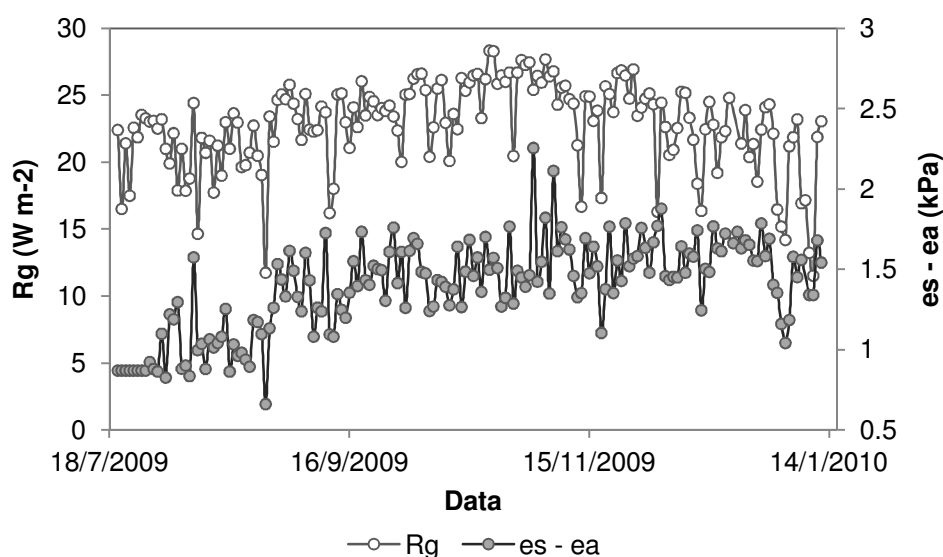
**Tabela 4.2.** Médias diárias dos elementos meteorológicos em cada estágio fenológico da cultura, registrados na área experimental durante a Etapa 2 (04 de novembro de 2009 a 11 de janeiro de 2010).

<b>Estádio fenológico</b>	<b>Período</b>	<b>Ta (°C)</b>	<b>UR (%)</b>	<b>u<sub>2</sub> (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Rg (MJ m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Ra</b>	<b>τ</b>
1	03 a 25/11	26,62	67,41	3,41	24,27	37,93	0,64
2	26/11 a 12/12	26,89	69,60	3,08	23,04	37,70	0,61
3	13/12 a 04/01	26,84	72,63	2,56	21,30	37,67	0,57
4	05 a 11/01	26,46	74,64	2,02	17,94	37,83	0,47

Ta: temperatura do ar, UR: umidade relativa do ar, u<sub>2</sub>: velocidade do vento a 2 m de altura, Rg: radiação solar global, Ra: radiação solar no topo da atmosfera e τ: transmissividade atmosférica.

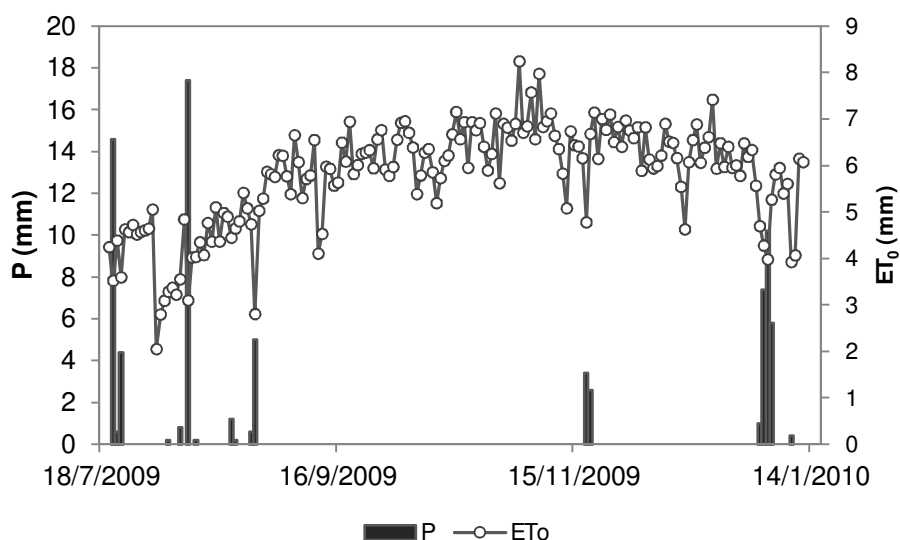
Na figura 4.1 apresenta-se o comportamento de Rg medida e do déficit de pressão de vapor d'água determinado a partir de observações da estação meteorológica automática do INMET, localizada na Fazenda Norfruit, para o

período de 20 de julho de 2009 a 12 de janeiro de 2010, que compreende o ciclo de todas parcelas avaliadas. A maior incidência de radiação solar na superfície ocorreu no dia 21 de outubro ( $28,36 \text{ MJ m}^{-2}$ ), enquanto que no dia 10 de janeiro de 2010 registrou-se o menor valor,  $11,55 \text{ MJ m}^{-2}$ , em conformidade às medidas tomadas na área experimental. O déficit de pressão de vapor ( $e_s - e_a$ , em que  $e_s$ : pressão de saturação de vapor d'água,  $e_a$ : pressão atual de vapor d'água) é um indicador da demanda evaporativa da atmosfera: quanto maior o seu valor, menor a quantidade de vapor d'água no volume de ar àquela temperatura. Durante os meses de julho e agosto foram detectados os menores valores deste parâmetro ( $0,66 \text{ kPa}$ , em 26 de agosto), que evoluiu a partir do mês de outubro, atingindo valor máximo de  $2,26 \text{ kPa}$  (01 de novembro).



**Figura 4.1.** Déficit de pressão de vapor d'água ( $e_s - e_a$ ) e radiação solar global ( $R_g$ ) medidos na Estação Meteorológica do INMET em Mossoró durante o período de 20 de julho de 2009 a 12 de janeiro de 2010.

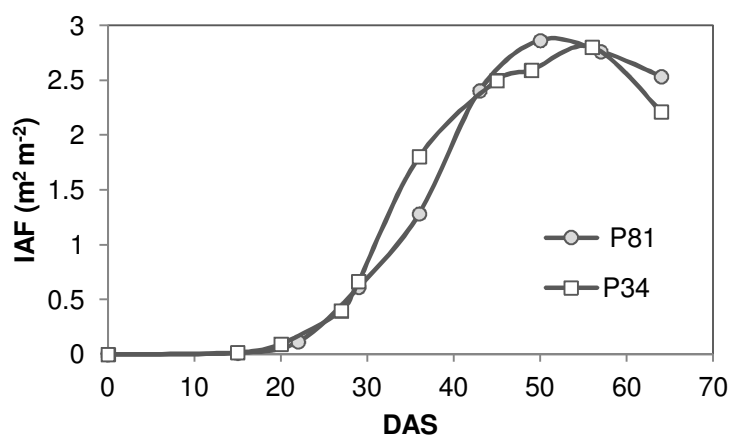
Valores de precipitação medidos na estação do INMET na Fazenda Norfruit, bem como da evapotranspiração de referência para todo período avaliado são apresentados na Figura 4.2. O volume precipitado foi pequeno, no total de 76 mm, concentrados principalmente nos meses de julho e agosto de 2009 e janeiro de 2010. As precipitações foram de 25,6 mm em agosto e 24,8 mm até dia 11 de janeiro, compondo mais da metade do total observado. A  $ET_0$  total foi 1018 mm, evidenciando a elevada demanda hídrica da atmosfera local. O comportamento da  $ET_0$  foi semelhante ao curso da radiação global incidente, bem como do déficit ( $e_s - e_a$ ), apresentados na Figura 4.1. O mês de máxima demanda hídrica foi novembro, com  $ET_0$  diária média de 6,7 mm, enquanto que os menores valores da  $ET_0$  coincidiram com as temporadas de chuva. Os valores mínimo e máximo da  $ET_0$  foram 2,0 mm em 01 de agosto e 8,24 mm em 01 de novembro.



**Figura 4.2.** Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e precipitação (P) registrada na estação do INMET em Mossoró durante período de 20 de julho de 2009 a 12 de janeiro de 2010.

#### 4.1.2. Desenvolvimento da cultura e Balanço de Energia pela Razão de Bowen

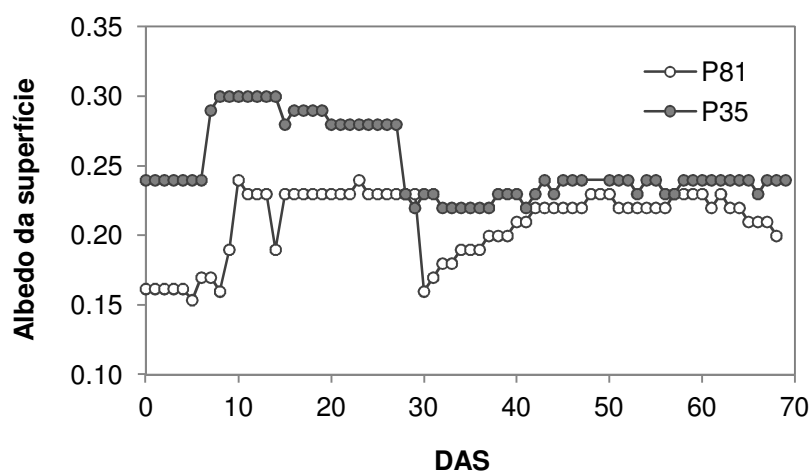
A cultura apresentou semelhante evolução da área foliar nas duas etapas, conforme apresentado na Figura 4.3. O índice de área foliar (IAF) da fase que compreende a plena floração e o início da frutificação foi de  $1,85 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  na P81 e  $1,80 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  na P35. Aos 40 DAS, a cultura havia atingido cobertura de 80% da área plantada, momento a partir do qual a planta apresenta maior demanda por água. O máximo IAF foi registrado no início da fase de maturação dos frutos, aos 50 dias após sementeira – DAS na P81 ( $2,86 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ) e aos 57 DAS na P35 ( $2,80 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ). Na proximidade da colheita o IAF decresceu para  $2,54 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  na P81 e  $2,34 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  na P35. O modelo cúbico ajustou bem o comportamento do IAF no ciclo do meloeiro, resultando nas funções  $IAF = - 0,0001DAS^3 + 0,0118DAS^2 - 0,3137DAS + 2,4141$  ( $R^2 = 0,9899$ ) para as plantas da parcela 81 e  $IAF = - 0,0001DAS^3 + 0,0109DAS^2 - 0,2683DAS + 1,906$  ( $R^2 = 0,9728$ ) no ciclo da parcela 35.



**Figura 4.3.** Evolução do índice de área foliar (IAF) do meloeiro cultivado nas parcelas 81 e 35 da fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), na safra 2009/2010. DAS: dias após sementeira.



O balanço de energia no campo de melão foi influenciado não somente pelo crescimento do dossel vegetativo, como também pelas particularidades do manejo da cultura. Na primeira semana após o plantio, o albedo medido na Parcela 81 ficou em torno de 0,16, em virtude da reflectância conjunta do solo exposto com a cobertura plástica, que é de cor cinza escuro. Para o mesmo período, na parcela 35 o albedo foi superior, com média de 0,24, conforme é apresentado na Figura 4.4. A área onde fora implantada a parcela 81 apresenta solo arenoso, porém de cor vermelho-escuro, provavelmente pela presença de óxidos de ferro. Tal característica é responsável pela diminuição da reflectância do mesmo, enquanto que solos arenosos de cor mais clara, tal como na parcela 35, tendem a apresentar maior albedo (Demattê et al., 2004; Dalmolin et al., 2005).



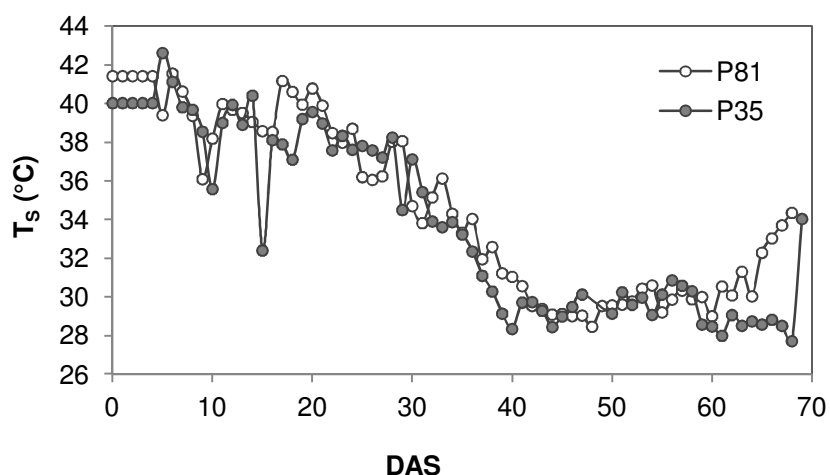
**Figura 4.4.** Albedo da superfície registrado durante o ciclo do meloeiro cultivado nas parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), na safra 2009/2010. DAS: dias após semeadura.

Após a colocação da manta, o albedo subiu para 0,23 na P81 e 0,29 na P35, por causa da cor branca do tecido. Nesta ocasião, verificou-se uma queda

de 9% e 12% no saldo de radiação nas respectivas parcelas. O albedo decresceu para valores médios de 0,19 e 0,22 após a retirada da manta e voltou a aumentar a partir dos 37 DAS, durante estágio de crescimento vegetativo, alcançando valores médios de 0,22 (P81) e 0,23 (P35) quando as plantas atingiram 80% da cobertura do solo, permanecendo assim até a colheita.

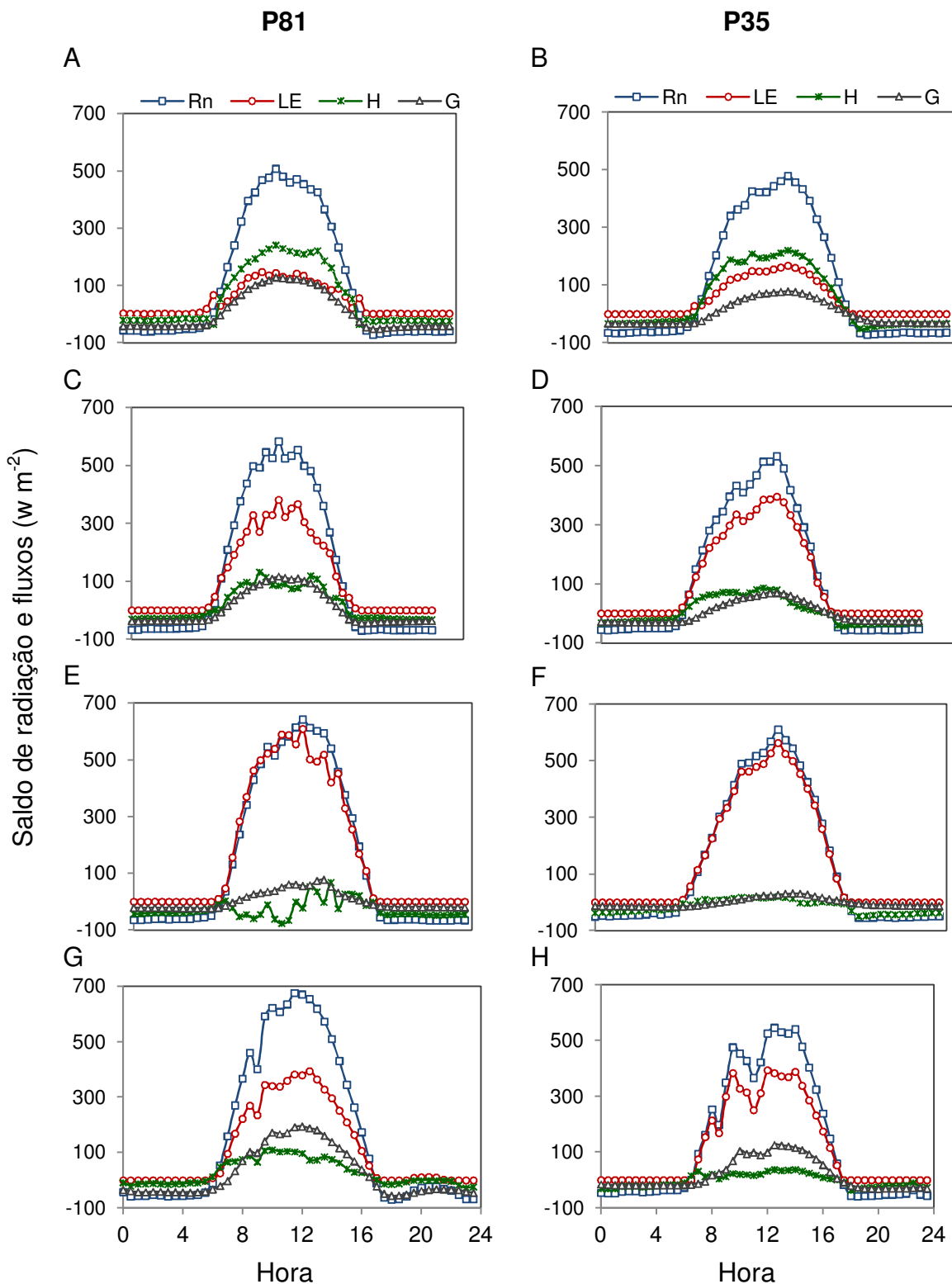
Medidas da temperatura da superfície do solo ( $T_s$ ) efetuadas com um radiômetro infravermelho mostraram distribuição da  $T_s$  semelhante nos dois períodos estudados (Figura 4.5). Na primeira semana, a média da  $T_s$  diurna diária foi 41°C na P81 e 40°C na P35. Os valores diurnos médios durante o período da utilização da manta caíram um grau em cada parcela, o que verificou-se exatamente no dia posterior à colocação da mesma. O máximo valor de  $T_s$  na parcela 81 foi 55 °C, registrado às 12:30 h (ou seja, média do intervalo entre 12:00 e 12:30 h) do dia 20 de agosto. Na P35 a máxima  $T_s$  também ocorreu na primeira semana após sementeira, no dia 06 de novembro às 12:00 h, com valor de 53 °C.

Durante o estágio médio da cultura, onde se verifica o máximo desenvolvimento vegetativo e também a maior demanda hídrica, as temperaturas diurnas estiveram, na média, 30°C na P81 e 29°C na P35, mantendo esse padrão até a colheita. Nota-se que em P35 as médias foram em 1°C inferiores, o que pode estar relacionado com o albedo relativamente maior registrado nesta parcela. Verificou-se durante o estágio médio que os valores de temperatura do ar nas proximidades do dossel, registrados pelo psicrômetro, estavam muito próximos da temperatura da superfície. Neste período as máximas de  $T_s$  foram 36 °C na P81 (dia 05 de outubro, às 12:00 h) e 35 °C na P35 (dia 29 de dezembro, às 13:00 h).



**Figura 4.5.** Temperatura da superfície do solo ( $T_s$ ) registrada durante o ciclo do meloeiro cultivado nas parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), na safra 2009/2010. DAS: dias após sementeira.

O comportamento diário dos componentes do balanço de energia é apresentado na Figura 4.6, em médias para cada estágio fenológico da cultura. O  $R_n$  do final do ciclo na P81 foi superior ao  $R_n$  do mesmo período na P35, em virtude do fim do ciclo das plantas na primeira parcela coincidir com o mês de outubro, que é o de máxima incidência de radiação na região. Contudo, a proporção dos fluxos em cada estágio foi semelhante nas duas parcelas. O fluxo de calor no solo começou com participação de 20% de  $R_n$  no estágio inicial da cultura, caindo para menos de 10% durante o crescimento dos frutos, estágio no qual foram registrados valores diurnos negativos. Teixeira et al. (2008a) apontaram como possíveis causas de  $G$  negativo o alto IAF e irrigações intermitentes, condições estas verificadas no referido período.



**Figura 4.6.** Valores médios dos componentes do balanço de energia determinados pelo método BERB nas parcelas 81 e 35, distribuídos nos estádios fenológicos do meloeiro: A e B, estágio inicial; C e D, estágio de crescimento vegetativo; E e F, estágio de frutificação; G e H, dados do dia da colheita.

No estágio inicial da cultura, cerca de 40% da energia disponível ( $R_n - G$ ) foi utilizada para a evapotranspiração. Durante o período de crescimento dos frutos (estádio médio), LE correspondeu a praticamente toda energia disponível no período diurno, chegando a ultrapassar o saldo de radiação (Figura 4.6 E e F), ocasião em que o fluxo de calor sensível tornava-se negativo. Ainda no estágio final, LE correspondeu a 77 e 89% da energia disponível em P81 e P35, respectivamente. A máxima proporção da energia disponível utilizada para o aquecimento do ar (H) foi 61% e ocorreu, para as duas etapas, no estágio inicial da cultura. Durante o estágio médio, registraram-se valores de H inferiores a  $100 \text{ W m}^{-2}$ , muitas vezes em torno de zero ou negativos, como descrito anteriormente (Figura 4.6 E e F). Ao fim do ciclo da cultura, com a diminuição da lâmina de irrigação e o decréscimo da área foliar, em torno de 21% de ( $R_n - G$ ) foi destinado a H. Hernandez-Ramirez et al. (2010) encontraram proporção de 0,86 entre LE e  $R_n$  durante completo desenvolvimento de soja e milho. Teixeira et al. (2008a) reportaram que, em média, 89% de  $R_n$  foi destinado a LE e 11% a H na fase de floração de mangueiras no semiárido Nordeste, registrando em dois dias médias diárias negativas para H. Em plantio de crotalária, Takagi et al. (2009) registraram partição de 80% da energia disponível ( $R_n - G$ ) para evapotranspiração, e apenas 20% para o fluxo de calor sensível.

Alguns autores sugerem que a relação  $LE/R_n > 1$  ocorra devido à advecção de calor sensível na área irrigada, o que compreende um aporte de energia de fora do sistema que contribuiria para a evapotranspiração (Tood et al., 2000; Gavilán e Berengena, 2007; Zegaff et al., 2008). Por outro lado, Penman et al. (1967) indicam que em situações na qual uma cultura, com irrigações intermitentes e adequadas cobre todo o solo, a temperatura do ar nas

proximidades deste dossel pode ser inferior à temperatura registrada no nível mais acima. Nesta condição, o fluxo de calor sensível seria negativo (de cima para baixo), ao contrário do fluxo de vapor, gerando  $\beta$  também negativo. Allen et al. (2011) afirmam que, segundo a lei de conservação de energia, taxas de calor latente que ultrapassem a energia disponível ( $R_n - G$ ), ocorrem por extração de energia adicional da atmosfera via movimentos convectivos de transferência de calor sensível, de cima para a superfície. Valores de  $\beta$  entre -0,7 e -0,01 foram observados quando LE foi superior a  $R_n$  no período diurno, resultados semelhantes aos registrados por Zegaff et al. (2008) em área de milho irrigado, com  $-0,3 < \beta < 0,1$ , durante o dia. Penam et al. (1967) reportaram  $\beta$  de -1,15 a -0,08 no período diurno em campo de sorgo com 0,75 m de altura, em pleno crescimento e Hernandez-Ramirez et al. (2010) registraram  $\beta = -0,2$  em plantio de soja no Meio-Oeste dos Estados Unidos. Em área cultivada com uva no semiárido nordestino, Soares et al. (2007), com um sistema BERB, também obtiveram  $\beta$  negativo (até -1,49) no período de maturação dos frutos e após a poda de renovação, os quais ocorreram em diversos momentos do dia.

Além da adoção de *fetch* adequado, durante o estágio médio, em ambas as parcelas, o IAF foi superior a  $1,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  e a área era irrigada diariamente. Portanto, possivelmente a segunda hipótese apresentada acima explique o comportamento dos fluxos. Na Tabela 4.3 estão as médias horárias da temperatura de bulbo seco nos dois níveis, dos fluxos não radiativos e  $\beta$ , referentes aos dias 277 e 351, correspondentes ao período de máxima cobertura vegetal. Durante quase todo período diurno obteve-se  $\beta < 0$ , exatamente nas situações em que a temperatura registrada a 1,80 m foi superior à medida mais próximo ao dossel vegetal. Em 77 e 50% dos dias correspondentes à fase de

crescimento dos frutos (IAF máximo) em P81 e P35, respectivamente, observou-se este comportamento nas temperaturas de bulbo seco.

**Tabela 4.3.** Médias horárias das temperaturas da termojunção seca dos psicrômetros instalados sobre o dossel ( $T_{inferior}$ ) e um nível mais acima ( $T_{superior}$ ), do saldo de radiação (Rn), da Razão de Bowen ( $\beta$ ) e dos fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e calor no solo (G) para os dias 277 (P81) e 351 (P35).

Hora	$T_{inferior}$ °C	$T_{superior}$ °C	Rn	LE	H	G	$\beta$
W m <sup>-2</sup>							
Dia 277 – 53 DAP							
7:00	25,1	25,2	143,6	171,9	-28,1	-0,3	-0,16
8:00	26,8	27,0	357,8	398,4	-61,5	20,8	-0,15
9:00	28,3	28,6	522,1	628,3	-139,1	33,0	-0,22
10:00	29,7	30,2	628,6	841,9	-259,9	46,5	-0,31
11:00	30,8	31,3	672,2	765,6	-197,8	104,4	-0,26
12:00	31,5	31,8	690,6	862,1	-235,8	64,3	-0,27
13:00	31,1	30,7	652,1	534,6	52,4	65,1	0,10
14:00	29,9	30,2	470,3	620,0	-180,5	30,9	-0,29
15:00	29,8	29,7	389,1	352,3	17,1	19,8	0,05
16:00	28,5	28,5	197,1	165,4	24,6	7,1	0,15
Dia 351 - 44 DAP							
7:00	25,9	26,0	78,1	97,2	-7,3	-11,8	-0,07
8:00	26,2	26,2	117,2	126,6	-1,3	-8,1	-0,01
9:00	29,3	29,2	411,7	409,3	3,0	-0,5	0,01
10:00	30,2	30,6	420,6	434,3	-18,6	4,9	-0,04
11:00	30,2	30,8	264,8	270,3	-18,3	12,8	-0,07
12:00	31,4	31,7	343,7	339,7	-12,4	16,4	-0,04
13:00	32,2	32,2	591,0	570,2	0,5	20,2	0,00
14:00	32,6	32,5	557,7	524,1	4,4	29,2	0,01
15:00	30,7	30,8	318,4	303,0	-2,9	18,3	-0,01
16:00	30,4	30,7	222,3	218,5	-8,9	12,7	-0,04

#### 4.1.3. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo pelo método BERB

No estágio inicial a  $ET_{BERB}$  média foi de 1,18 mm e 1,94 mm (Tabela 4.4), chegando ao máximo de 7,87 mm (53 DAS) e 7,05 mm (47 DAS) em P81 e P35, respectivamente. Os valores totais de lâmina evapotranspirada pela cultura foram 256,44 mm em P81 e 273,31 mm em P35. O valor superior em P35 deve-se ao fato de a  $ET_0$  ter sido maior neste período, ou seja, 442,51 mm, enquanto que no período de cultivo em P81, foram registrados 436,45 mm. Além disso, a fase de máxima demanda hídrica (crescimento dos frutos) foi mais longa em P35 (Tabela 3.5). Com determinações lisimétricas com melão 'Gold Mine' cultivado sem *mulch* no Ceará, Miranda et al. (1999) encontraram valores médios de ET no estágio inicial de 1,2 mm e máximo de até 6,8 mm no período de crescimento dos frutos (42 e 58 DAS).

Ainda na Tabela 4.4, observa-se que a quantidade de água aplicada excedeu a  $ET_{BERB}$ , exceto no estágio inicial das plantas na P35 e no estágio final de ambas as parcelas. Ao fim do ciclo, o manejo adotado na região preconiza diminuir a lâmina de irrigação para favorecer o amadurecimento do fruto e evitar rachaduras pelo excesso de água. Durante todo ciclo foram aplicados 69 mm e 66 mm a mais de água do que o total evapotranspirado pela cultura segundo o método BERB em P81 e P35, respectivamente, ou seja, 25% a mais. Tais valores são realmente acentuados quando extrapolados para toda a área plantada na fazenda, o que ressalta mais a importância de se estabelecer um manejo da irrigação adequado às condições de clima e solo da área de estudo.

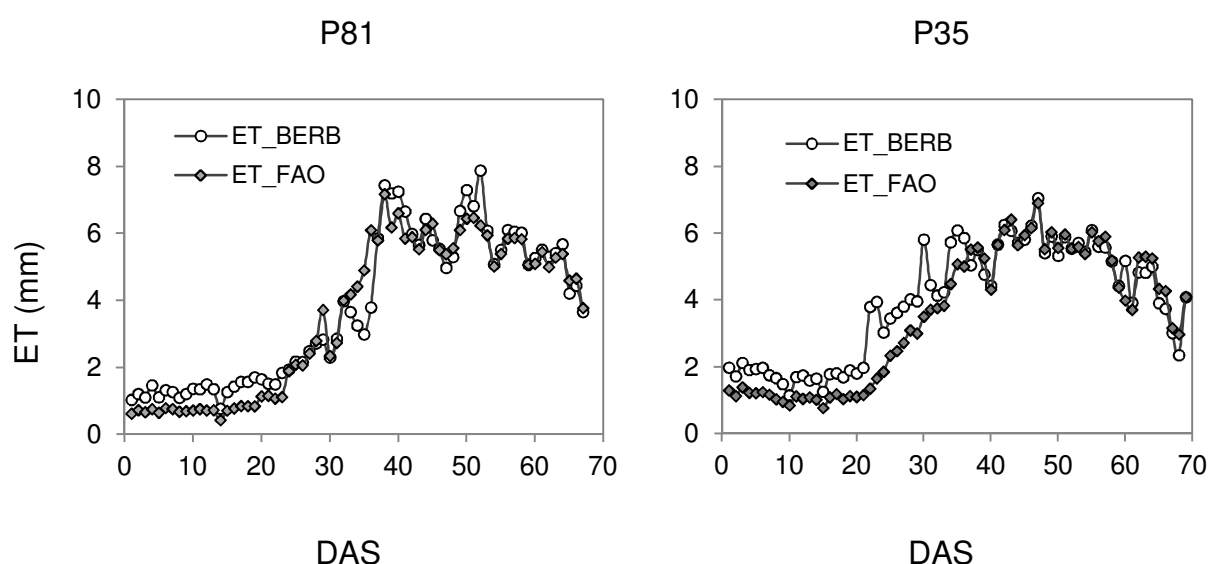


**Tabela 4.4.** Valores médios diários da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), evapotranspiração do meloeiro ( $ET_{BERB}$  e  $ET_{FAO}$ ) e lâmina de irrigação (I), todas em mm, para as fases do manejo de irrigação do meloeiro nas parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN), safra 2009/2010.

Períodos	P81				P35			
	$ET_0$	$ET_{BERB}$	$ET_{FAO}$	I	$ET_0$	$ET_{BERB}$	$ET_{FAO}$	I
	mm				mm			
Plantio à instalação da manta	4,56	1,18	0,68	1,37	7,33	1,94	1,25	1,37
Período das plantas sob manta	6,16	1,60	0,86	2,4	6,56	2,21	1,05	2,4
Crescimento dos frutos	6,28	6,11	5,84	8,4	5,94	5,55	5,24	8,4
Maturação à colheita	6,40	4,94	4,10	4,4	5,59	3,96	3,58	3,75
Totais	436,45	256,44	242,76	325,20	442,51	273,31	244,42	339,60

Na Figura 4.7 é apresentada a distribuição da  $ET_{BERB}$  e a  $ET_{FAO}$  para todo o ciclo da cultura. Em ambas as parcelas observa-se uma boa concordância das curvas dos dois métodos, sobretudo a partir dos 40 dias após semeadura. As maiores divergências ocorreram na fase inicial da cultura e no período das plantas sob a manta, em que  $ET_{BERB}$  foi superior a  $ET_{FAO}$  em 56% na parcela 81 e 61% na parcela 35. Contudo, analisando todo período da cultura, registrou-se bom ajuste entre dados medidos e estimados. Para P81 e P35, respectivamente, obteve-se RQME de 0,63 mm e 0,76 mm; dw de 0,98 e 0,96; e  $R^2$  de 0,92 e 0,81. Os valores de RQME tendendo a zero e valores de dw e  $R^2$  em torno de 1 indicaram boa

concordância entre os métodos. A razão média, RM, mostrou que para todo ciclo da cultura houve superestimativa do método BERB de apenas 6 e 12% em P81 e P35. Resultados apresentados por Lovelli et al. (2005) revelaram subestimativas de 32 % para a  $ET_{FAO}$  em comparação com dados de lisímetro em meloeiro cultivado com *mulch* plástico, para todo o ciclo da cultura. Os resultados do presente trabalho mostram que as medidas tomadas para ajustar os coeficientes de cultivo do Manual 56 da FAO para Irrigação e Drenagem às condições de clima e manejo da área foram satisfatórias, considerando que a cobertura plástica proporcionaria 10% de redução no  $K_c$  total.



**Figura 4.7.** Evapotranspiração do meloeiro cultivado com *mulch* plástico, obtida com o Balanço de Energia pela Razão de Bowen ( $ET_{BERB}$ ) e pelo produto  $ET_0 \times K_c - ET_{FAO}$ , nas parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN). DAS: dias após semeadura.

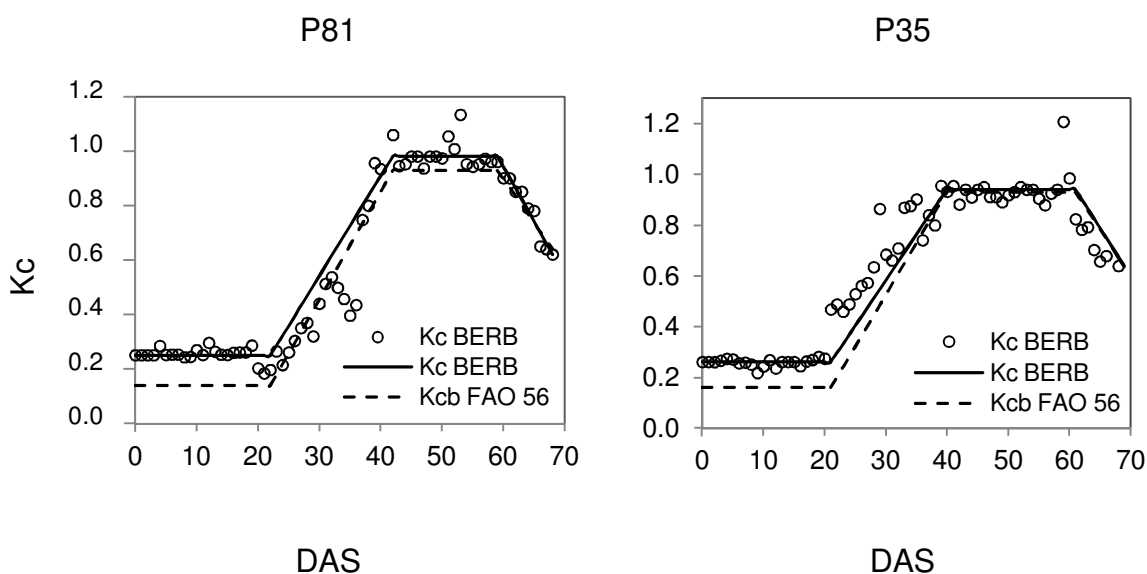
Allen et al. (2011) consideram que, a despeito da transferência de calor sensível por convecção ou advecção à superfície evaporante, há um limite superior da ET, causado por limitações no transporte aerodinâmico e pelo

equilíbrio das forças envolvidas na ET sobre o dossel vegetativo. Os autores consideram tal limite bem representado pela evapotranspiração de referência calculada para a alfafa, a qual é maior que a  $ET_0$ , determinada sobre superfície gramada, considerando a equivalência em todos os dados atmosféricos. Desta forma, apesar dos valores de LE neste trabalho superarem  $(R_n - G)$  em alguns momentos, conforme discutido anteriormente, não foram superiores à  $ET_0$  (Tabela 4.4), o que demonstra a consistência dos dados.

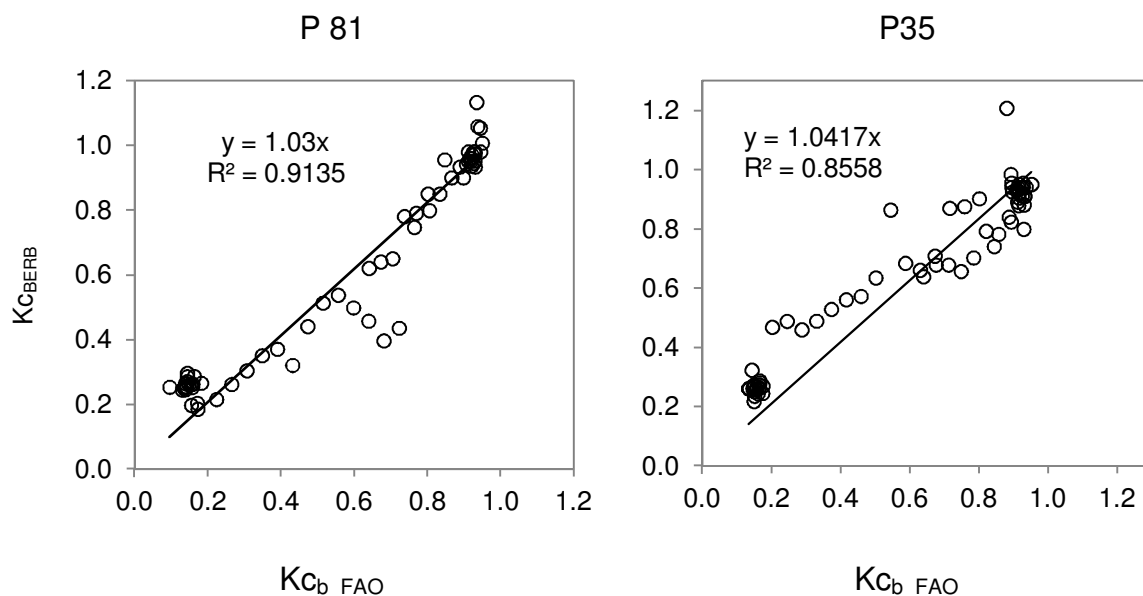
A duração dos estádios fenológicos, bem como do ciclo total da cultura proposto no Manual 56 da FAO, difere bastante do registrado na região de estudo. Para a Região do Mediterrâneo, Allen et al. (1998) reportaram ciclo 120 dias para meloeiro sem *mulch* e Lovelli et al. (2005) registraram ciclo de 75 dias em cultivo com *mulch* plástico. No presente trabalho, em ambas parcelas, o ciclo da cultura foi de 68 dias. As condições climáticas da região contribuem para que a cultura se desenvolva mais rápido, bem como o uso do *mulch* (Morais et al., 2008), que também acelera a maturação dos frutos (Sampaio e Araújo, 2001). Tais adequações na duração dos estádios devem ser consideradas no esquema da irrigação para evitar aplicações indevidas.

Em virtude da cobertura plástica e do sistema de irrigação por gotejamento, perdas de água por evaporação são insignificantes e ocorrem somente pelo orifício de emergência das plântulas, e cessam poucos dias após a mesma. Desta forma, utilizou-se os valores de  $K_{c_{b\_FAO}}$  ( $K_c$  basal) indicados para a cultura do meloeiro. Após os devidos ajustes para as condições climáticas locais e de cultivo com *mulch* plástico, o  $K_{c_{b\_FAO}}$  inicial foi 0,14 em P81 e 0,16 em P35. Para os estádios fenológicos médio e final o valor foi o mesmo nas duas parcelas: 0,93 e 0,64. Os coeficientes de cultivo determinados com o método BERB para os

estádios inicial, médio e final em P81 foram: 0,25, 0,98 e 0,62; e em P35: 0,26, 0,94 e 0,64. Diferenças acentuadas são observadas no  $K_c$  inicial, nas duas épocas de estudo (Figura 4.8), enquanto que nas demais fases os valores sugeridos pela FAO são bastante consonantes aos encontrados na região de estudo, resultando em alto coeficiente de determinação da regressão linear entre os dois métodos (Figura 4.9). Lovelli et al. (2005) registraram bom ajuste do  $K_c$  obtido por lisímetro com o  $K_{cFAO}$  inicial e diferenças no  $K_c$  do estágio médio, com valores entre 1,0 e 1,6, para  $K_{cFAO}$  correspondente de 0,8. Miranda et al. (1999) e Bezerra et al. (2004) reportaram para a fase inicial  $K_c$  em torno de 0,2, entretanto, para condições sem *mulch*. Considerando a redução de 10% no  $K_c$  com a cobertura do solo, ainda assim seriam inferiores ao encontrado no presente trabalho.



**Figura 4.8.** Coeficientes de cultivo gerados pelo método BERB (valores pontuais em círculos, valores médios para cada estágio em linha contínua) e curva dos coeficientes de cultivo estimados pelo método FAO para as parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN). DAS: dias após semeadura.

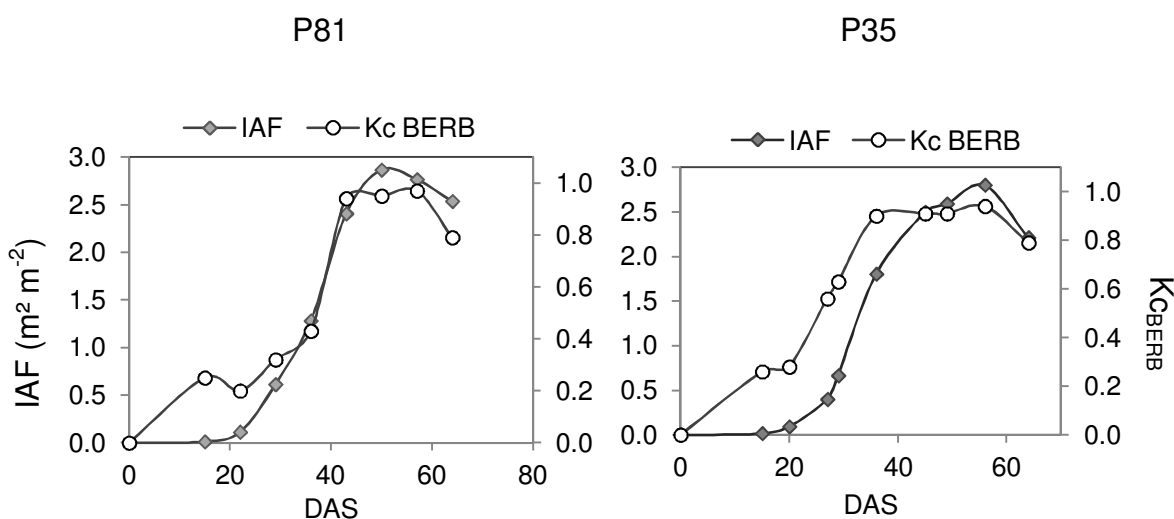


**Figura 4.9.** Correlação entre os coeficientes de cultivo do meloeiro gerados pelo método BERB e estimados pelo método FAO para a parcela 81 e parcela 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN).

Valores elevados da evapotranspiração e  $K_{C_{BERB}}$  para o estágio inicial da cultura podem estar associados ao aumento da temperatura do ar nas proximidades do psicrômetro inferior causado pelo *mulch*, que pelas suas características (cor e material) absorvem boa parte da radiação solar que nele incide, transferindo calor, conforme já reportado por Sampaio & Araújo (2001) e corroborado pelas altas temperaturas da superfície registradas na fase inicial da cultura. O valor de  $\beta$  diminui com diferenças acentuadas de temperatura de bulbo úmido entre os dois níveis e, quanto menor  $\beta$ , maior o fluxo de calor latente. Desta forma, mesmo não havendo fluxo expressivo de vapor d'água na fase inicial, o modelo interpreta ao contrário, pelos motivos apresentados acima. A alta reflectância da manta de polipropileno também pode ter acarretado o mesmo

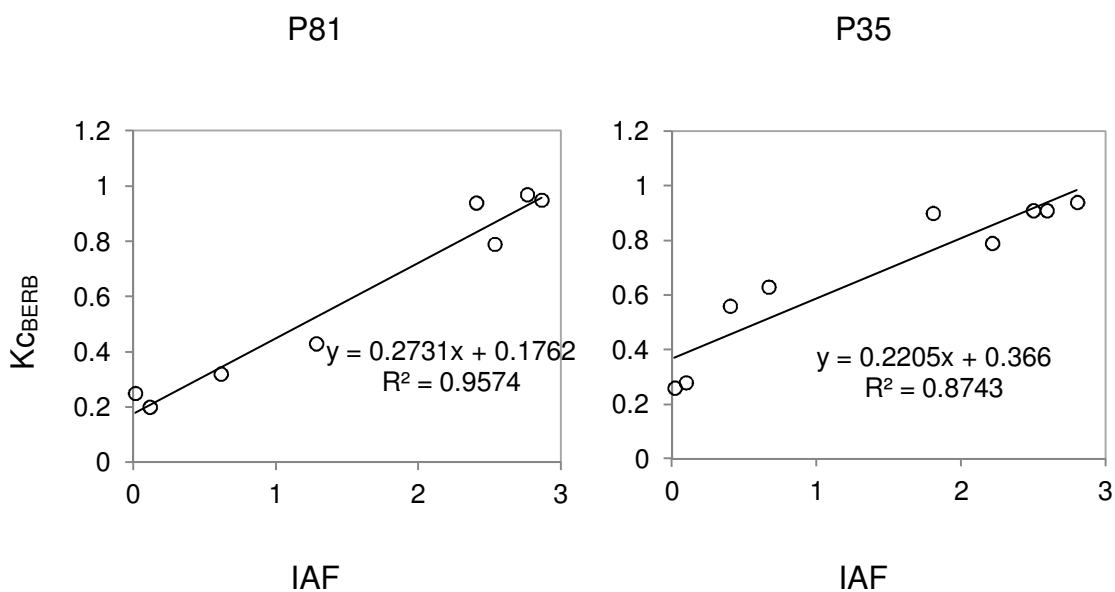
problema, por aumentar a incidência de radiação sobre os psicrômetros, elevando a temperatura do ar no seu interior.

A evolução do coeficiente de cultivo foi avaliada segundo os dias após a semeadura e o grau de cobertura do solo. As curvas de  $K_{cBERB}$  e IAF tiveram desenvolvimento semelhante (Fig. 4.10), exceto apenas no DAS 15 o  $K_{cBERB}$  afasta-se da tendência do IAF, mesma época onde verificou-se maior diferença deste com  $K_{cFAO}$ . As seguintes equações foram encontrados com o ajuste do  $K_{cBERB}$  em função de DAS:  $Kc = -2E^{-05}DAS^3 + 0,0023DAS^2 - 0,0455DAS + 0,4107$  ( $R^2 = 0,9223$ ) na Parcela 81 e  $Kc = -2E^{-05}DAS^3 + 0,0014DAS^2 - 0,0167DAS + 0,2799$  ( $R^2 = 0,9376$ ) na Parcela 35. Apesar do modelo polinomial de segundo grau ser amplamente utilizado, o modelo cúbico foi adotado por ter apresentado maior coeficiente de determinação, conforme também adotado por Bezerra et al. (2010).



**Figura 4.10.** Evolução do  $K_{cBERB}$  e do índice de área foliar (IAF) durante o ciclo da meloeiro nas parcelas 81 e 35 da fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN).

A relação linear entre  $K_{C_{BERB}}$  e IAF resultou em alto coeficiente de correlação, conforme mostra a Figura 4.11. Isto ressalta que, com a cobertura plástica, o  $K_{C_{BERB}}$  determinado assemelha-se ao Kc basal apresentado por Allen et al. (1998), que leva em consideração apenas a transpiração do vegetal. Portanto, no emprego do  $K_{C_{FAO}}$  no manejo do meloeiro cultivado com *mulch* em sistemas de gotejamento, deve-se considerar a redução no valor do mesmo em virtude de não ocorrer perda de água por evaporação, na ausência de precipitações.



**Figura 4.11.** Correlação entre o  $K_{C_{BERB}}$  e IAF, para as parcelas 81 e 35 da Fazenda Fruta Vida (Mossoró – RN).

## **4.2. Análise dos produtos gerados pelo SEBAL**

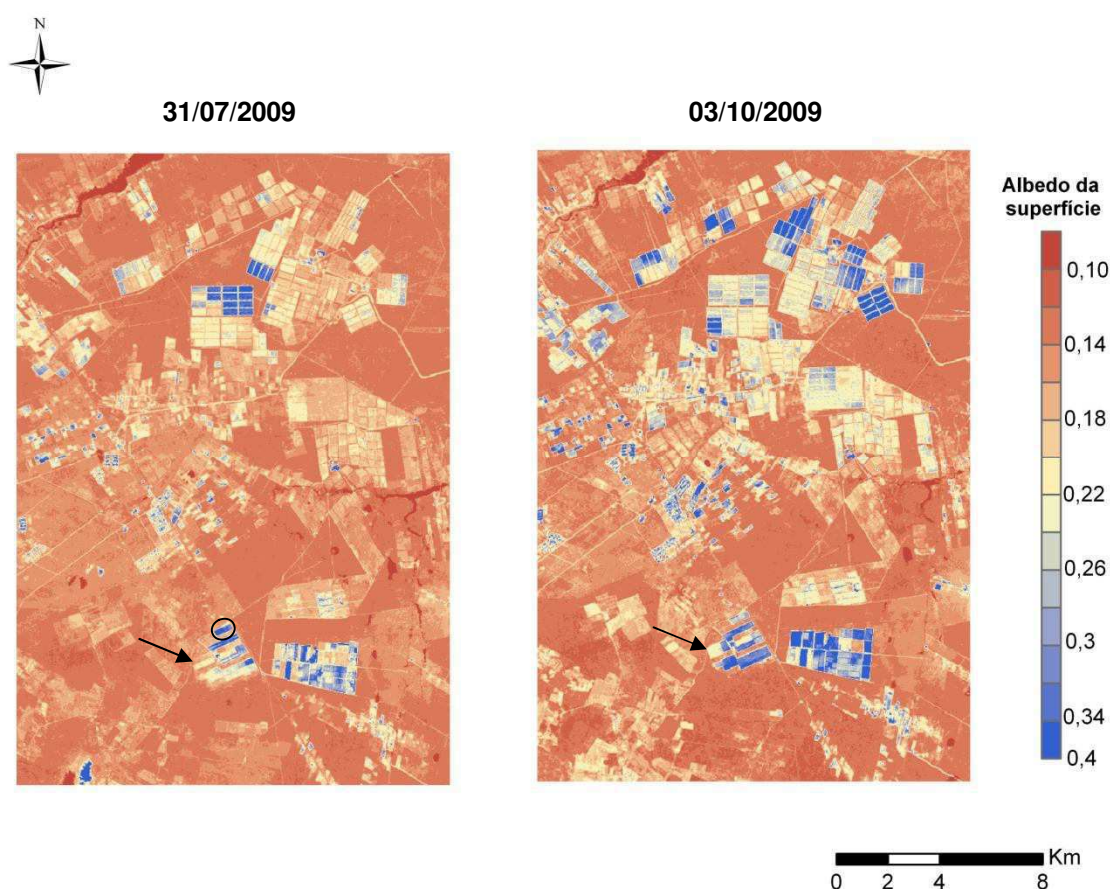
### **4.2.1. Balanço de radiação**

O albedo da superfície ( $\alpha$ ) é um dos componentes que mais determinam a razão entre a radiação líquida e a radiação incidente nesta superfície. Conforme discutido anteriormente, o saldo de radiação medido no campo sofreu sensível mudança quando da aplicação das mantas, em virtude da elevação do albedo. Mapas do albedo da superfície para os dias 31 de julho e 03 de outubro de 2009 são apresentados na Figura 4.12. A primeira data encontra-se no fim da estação chuvosa de 2009, enquanto que em 03 de outubro a estação seca já havia começado, sem registro de chuvas nos mês anterior.

As diferenças observadas em  $\alpha$  nas áreas agrícolas são devidas às diferentes idades das plantas cultivadas, práticas de manejo (colocação de manta, por exemplo) e níveis de umidade do solo, causados por variação na lâmina de irrigação na irrigação. Em áreas de solo exposto encontrou-se  $\alpha$  variando entre 16 e 30%, conforme a coloração do mesmo. A seta na cena de 31 de julho indica a parcela 81, com solo exposta nesta data, apresentando  $\alpha$  entre 16 e 18%. As áreas de solo mais avermelhado, possivelmente pela presença de óxidos de ferro, foram as que apresentaram o menor albedo, corroborando com Demattê et al. (2004). Parcelas com mantas instaladas sobre a cultura tiveram albedo superior a 30% em algumas propriedades. A área destacada na imagem do dia 31 de julho (Figura 4.12) refere-se às parcelas 6 e 8 da Fazenda Fruta Vida, as quais nesta data estavam com mantas instaladas sobre a linha de plantio (vide informações da Tabela 3.3). Nas áreas com meloeiro em pleno estágio de desenvolvimento ou na fase de formação dos frutos, o albedo esteve entre 20 e 22%, um intervalo muito frequente nas propriedades agrícolas na cena de 03 de outubro, inclusive



na Parcela 81, indicada pela seta nesta cena. Estes resultados concordam com Borges et al. (2010) que encontraram  $\alpha$  entre 20 e 30% em solo exposto, e valores no intervalo de 10 a 20% em áreas agrícolas irrigadas. Silva et al. (2011) também reportaram valores semelhantes para solos sem cobertura vegetal ( $\alpha > 28\%$ ) e cultivos irrigados ( $15\% < \alpha < 20\%$ ).



**Figura 4.12.** Albedo da superfície no instante de passagem do satélite Landsat 5 , gerado com imagens do sensor TM (órbita 216, ponto 63) para os dias 31 de julho e 03 de outubro de 2009.

O albedo das áreas cobertas pela vegetação natural Caatinga não apresentou grandes variações, situando-se entre 12 e 14%. Utilizando cenas Landsat da região do perímetro irrigado de Juazeiro-Petrolina, Silva et al. (2005a)

obtiveram  $\alpha$  de 20 e 24% para Caatinga nos anos de 2000 e 2001, respectivamente, ocorrendo maior precipitação pluviométrica no primeiro ano avaliado. Teixeira et al. (2008b) reportaram para Caatinga na mesma região,  $\alpha$  entre 12 e 16% (mínimos de 11% e máximos de 17%) nos anos de 2004 e 2005, os quais apresentaram as respectivas precipitações de 720 mm e 340 mm, superiores ao informado no trabalho anterior.

O total de precipitações no ano de 2009 em Mossoró atingiu 1203 mm, valor superior à média de 674 mm, o que pode explicar o baixo albedo das áreas de Caatinga, até mesmo no mês de outubro (Tabela 4.5). A água fornecida pela chuva garantiu a manutenção do dossel das plantas, o que é corroborado pelo IVDN destas áreas, em torno de 0,75 em 31 de julho e 0,65 em outubro.

Um comparativo dos valores instantâneos do albedo gerado pelo SEBAL com o medido em campo para o mesmo momento é apresentado na Tabela 4.6. Uma boa concordância foi observada entre os métodos, ressaltando apenas uma diferença de 2,0 pontos percentuais nas duas primeiras imagens. Na cena de 16 de agosto, o campo de cultivo era composto das leiras cobertas com plástico e as entrelinhas com solo exposto. O sensor em campo consegue integrar melhor estas duas superfícies distintas, do contrário, em nível orbital, a maior reflectância do plástico imperou na composição do pixel, portanto, o albedo SEBAL foi maior. O mesmo se verifica na cena do dia 01 de setembro, na qual as mantas já haviam sido instaladas. Em 03 de outubro, quando a superfície do campo estava bastante homogênea, com o dossel vegetativo cobrindo quase que a totalidade do solo, o albedo registrado no sensor TM foi idêntico ao medido em campo.

**Tabela 4.5.** Valores da precipitação pluviométrica para o ano de 2009 no município de Mossoró, obtidos na estação meteorológica do INMET na Fazenda Norfruit (5°4' S, 37°22' W, 36 m) e na estação meteorológica da Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA (5°11' S, 37°20' W, 37 m).

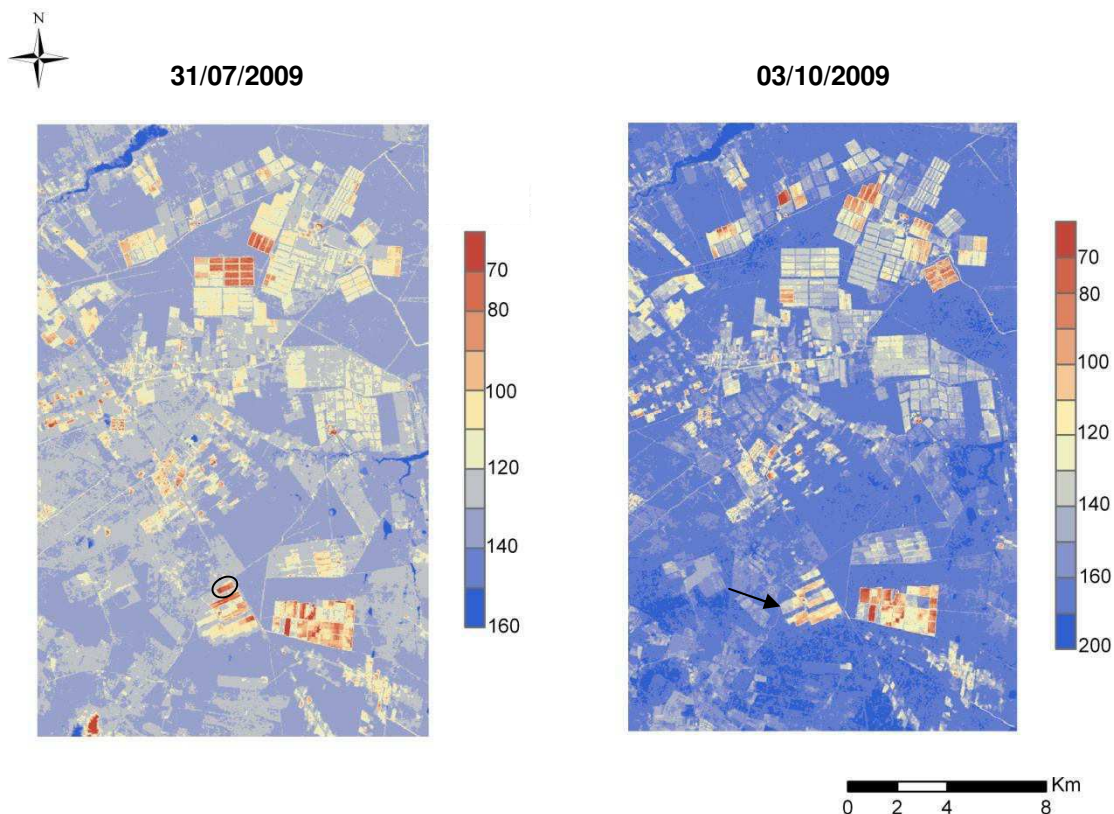
Mês	Precipitação pluviométrica (mm)	
	Estação do INMET	Estação da UFERSA
Janeiro	47	41,4
Fevereiro	193,2	199,15
Março	240,4	174,0
Abril	466,6	240,9
Maio	74,6	211,9
Junho	80,8	109,2
Julho	66,8	21,8
Agosto	24,8	26,2
Setembro	0,6	1,3
Outubro	1,0	0,0
Novembro	6,0	0,0
Dezembro	1,8	0,0
Total	1203,6	1025,9

**Tabela 4.6.** Comparativo do albedo ( $\alpha$ ), radiação de onda longa emitida ( $R_{OL\uparrow}$ ), saldo de radiação instantâneo ( $Rn_{Inst.}$ ) e saldo de radiação diário ( $Rn_{24h}$ ) obtidos pelo SEBAL (subscrito “S”) e pelo BERB (subscrito “B”) para o pixel correspondente ao local de instalação dos sensores (Parcela 81 da Fazenda Fruta Vida, Mossoró, 2009).

Data da imagem	$\alpha_B$	$\alpha_S$	$R_{OL\uparrow\_B}$	$R_{OL\uparrow\_S}$	$Rn_{Inst.\_B}$	$Rn_{Inst.\_S}$	$Rn_{24h\_B}$	$Rn_{24h\_S}$
	(%)		$(W\ m^{-2})$					
16/08/2009	15,0	17,2	541,8	444,3	518,7	519,2	118,8	117,0
01/09/2009	22,4	24,3	534,7	513,2	485,7	505,5	118,4	118,6
17/09/2009	20,1	21,2	495,7	446,3	572,0	597,1	147,6	146,2
03/10/2009	21,8	21,8	479,2	487,0	603,1	601,9	165,8	161,5

A evolução do saldo de radiação nas áreas de vegetação natural, entre os dias 31 de julho e 03 de outubro (Figura 4.13), foi condicionada principalmente pela radiação de onda curta incidente ( $R_g$ ), pois não houve grandes alterações no albedo e na cobertura vegetal durante este período. Valores diários de  $R_g$  foram  $269,0 \text{ W m}^{-2}$  em 31 de julho e  $307,9 \text{ W m}^{-2}$  em 03 de outubro. Os maiores valores de  $R_n$  foram registrados em corpos de água presentes nas cenas, quais sejam:  $160 \text{ W m}^{-2}$  (31 de julho) e  $200 \text{ W m}^{-2}$  (03 de outubro). Já os menores valores foram verificados nas parcelas de melão coberto com as mantas, como apresentada a área circulada na cena do dia 31 (Parcelas 6 e 8 da Fazenda Fruta Vida), com  $R_n < 90 \text{ W m}^{-2}$ . Nas duas cenas, observa-se que o saldo de radiação na Caatinga alcança valores superiores ao de algumas áreas irrigadas, devido ao baixo albedo registrado nesta vegetação. Por este fato, a relação  $R_n/R_g$  na caatinga ficou entre 0,49 e 0,55 nas duas datas, corroborando com Teixeira et al. (2008b), que reportaram partição de 53% de  $R_g$  para  $R_n$  na Caatinga.

Nas áreas agrícolas, o saldo de radiação variou conforme a idade das plantas e as práticas de manejo, especialmente pela utilização da manta. Valores de  $R_n/R_g$  entre 0,30 e 0,36 foram encontrados em parcelas com a manta e esta variação deve-se a diferentes idades das plantas sob o agrotêxtil. Para o meloeiro em máximo desenvolvimento, o saldo representou em torno de 47% da radiação incidente. Para solo exposto esta razão ficou entre 0,40 e 0,42. Em parreiral irrigado por gotejamento, Teixeira et al. (2008b) verificou  $R_g/R_n$  de 0,46. Já para parreiras e mangueiras irrigadas por microaspersão, este autores encontraram  $R_g/R_n$  de 0,55 e 0,53, respectivamente. Nestas duas últimas culturas, a fração molhada do solo contribuiu para  $R_n$  ser relativamente maior.



**Figura 4.13.** Saldo de radiação diário ( $\text{W m}^{-2}$ ) gerado com imagens do TM - Landsat 5 (órbita 216, ponto 63) para os dias 31 de julho e 03 de outubro de 2009.

Analisando-se o saldo de radiação instantâneo obtido pelo SEBAL com o valor medido em campo para o mesmo momento (Tabela 4.6), verifica-se que os valores do  $R_n$  pelo primeiro método foram superiores, com superestimativas de 4% em 16 de agosto e em 01 de setembro. Ao contrário, a radiação de onda longa emitida pela superfície gerada via SEBAL foi subestimada em comparação ao BERB, sendo 5% inferior na cena do dia 16 de agosto e 10% inferior na cena de 01 de setembro, o que explica  $R_n$  acima do registrado em campo. Comparando-se a emissividade da superfície ( $\epsilon_0$ ), calculada pelo SEBAL com a determinada em campo através das medidas do pirgeômetro e o termômetro infravermelho, constatou-se que a primeira sempre foi inferior. Esta diferença é

especialmente acentuada quando do período das plantas sob manta. Para o dia 01 de setembro,  $\epsilon_0$  determinada via SEBAL foi de 0,95, enquanto que em campo obteve-se 0,98. Tal fato decorre da superfície ser interpretada pelo algoritmo como área de solo nu, pois, em virtude da característica espectral das mantas, o IVAS destas áreas não passa de 0,15 e no SEBAL  $\epsilon_0$  é função do IAF. Já na última cena, como a superfície da área em questão estava bastante homogênea (alto IAF), ambas as emissividades foram 0,98 e o valor estimado de  $R_n$  foi praticamente igual ao medido em superfície. A emissividade encontrada em solo exposto foi 0,95, concordando com as emissividades registradas nos pixels quentes por Bastiaanssen (2000), as quais foram 0,94 e 0,92. Silva et al. (2005b) trouxeram resultados semelhantes, com  $\epsilon_0 = 0,92$  em solo exposto e 0,99 em vegetação irrigada.

A magnitude dos valores instantâneos de  $R_n$  (Tabela 4.6) concorda com outros trabalhos conduzidos nas condições semiáridas brasileiras, aplicando o SEBAL a imagens Landsat. Em pomares de coco e banana na fase de produção, localizados no Perímetro Irrigado São Gonçalo, na Paraíba, Silva et al. (2011) obtiveram  $R_n$  variando de  $637,2 \text{ W m}^{-2}$  no mês de agosto a  $697,3 \text{ W m}^{-2}$  no mês de novembro de 2008. No perímetro irrigado Juazeiro-Petrolina, Silva et al. (2005b) computaram  $R_n$  de culturas irrigadas entre  $627,4$  e  $664,5 \text{ W m}^{-2}$  nos meses de dezembro de 2000 e 2001. Borges et al. (2010) obtiveram em campos de algodão irrigado  $R_n$  de  $550$  a  $650 \text{ W m}^{-2}$  durante o período de máximo desenvolvimento vegetativo, na sub-bacia do médio São Francisco, Bahia.

A determinação do saldo de radiação diário pela Equação 3.52, considerando o coeficiente  $a = 143$  mostrou-se satisfatória, pois a maior diferença encontrada entre  $R_{n\text{SEBAL}}$  e  $R_{n\text{BERB}}$  foi  $4,3 \text{ W m}^{-2}$ . A seta indicando a Parcela 81

da fazenda Fruta Vida aponta para pixels com  $R_n$  em torno de  $160 \text{ W m}^{-2}$ , valor muito próximo ao medido em campo.

#### **4.2.2. Fluxos não radiativos e evapotranspiração**

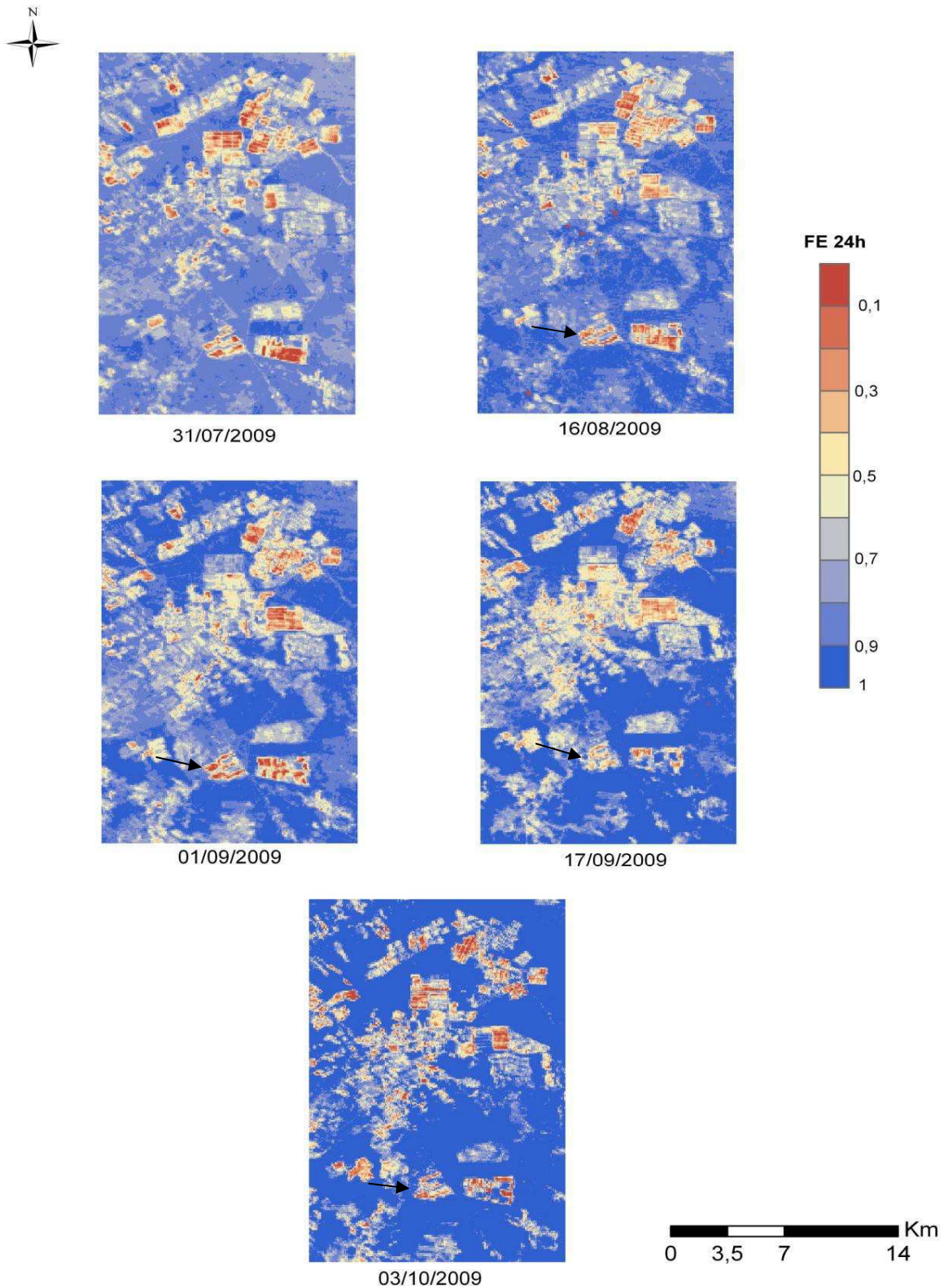
A fração de evaporação para o período de 24h foi determinada a partir do saldo de radiação e do fluxo de calor latente para o mesmo período, considerando para tal  $G = 0$  (Bastiaanssen, 2000). Um problema comum em modelos que determinam o balanço de energia à superfície é a extrapolação de valores instantâneos em diários. Entretanto, muitos trabalhos apresentam que a FE é estável em 24 horas (Crago e Brutsaert, 1996; Bastiaanssen et al., 1998a; 2000) e, a despeito de algum desvio em um dia particular, pode ser utilizada com acurácia na obtenção da evapotranspiração em escala semanal ou mensal (Bastiaanssen et al., 1998b; Farah et al., 2004; Teixeira et al., 2008b). Singh et al. (2008) afirmam que esta condição só é válida quando não há mudanças significativas na umidade do solo, o que é apropriado às superfícies agrícolas avaliadas, visto que a irrigação nos campos de melão é diária e mudanças na taxa de evaporação do solo praticamente inexistem, por causa da utilização do *mulch*.

Os mapas da partição de energia (Eq.3.50) para período de 24 horas são apresentados na Figura 4.14. As áreas cobertas com vegetação natural apresentaram fração de evaporação (FE) acima de 0,9 em todas as datas, o que significa que praticamente toda energia disponível foi convertida em calor latente. A característica da vegetação da caatinga em responder rapidamente às precipitações implica em alto FE após o período de chuvas. Teixeira et al. (2009b)

verificaram para o período chuvoso na região do Perímetro Irrigado Petrolina-Juazeiro que a FE na caatinga era semelhante à verificada em cultivos agrícolas. Kimura et al. (2007) constataram que a evapotranspiração de áreas de vegetação natural arbustiva em região semiárida da China aproximou-se da evapotranspiração de campos irrigados após o início da temporada de chuvas. Já Bastiaanssen et al. (1998b) reportaram para áreas de savana  $FE = 0,79$ .

Nas áreas com cultivos agrícolas, a FE variou bastante em decorrência principalmente da idade das plantas. Como o meloeiro é cultivado com *mulch* plástico, o fluxo de vapor d'água é relacionado apenas à transpiração das plantas. Portanto, os valores de FE apresentam-se baixos nas áreas onde a cultura está na fase inicial de desenvolvimento. De um modo geral, observa-se que em julho boa parte das áreas agrícolas tem  $FE < 0,1$ , pois nesta época iniciou-se o plantio da safra de 2009, situação que vai mudando à medida que os cultivos avançam em desenvolvimento. Em outubro verificou-se também baixos valores de FE nestas áreas, em virtude das mesmas já terem sido colhidas.





**Figura 4.14.** Fração de evaporação diária gerada com imagens do TM Landsat - 5 (órbita 216, ponto 63) para os dias 31 de julho, 16 de agosto, 01 de setembro, 17 de setembro e 03 de outubro de 2009.

A área onde os dados micrometeorológicos foram obtidos é indicada com setas nas cenas da Figura 4.14, percebendo-se a evolução da FE com o desenvolvimento da cultura. Em 16 de agosto FE obtida pelo SEBAL foi de 0,21, passando para 0,32 em 01 de setembro, evoluindo a 0,64 em 17 de setembro e atingindo máximo valor em 03 de outubro, com 0,96. Os dados registrados em campo, para as respectivas datas, foram de 0,32, 0,40, 0,55 e 1,04. O valor de FE superior a 1,0 para 03 de outubro relaciona-se a calor sensível negativo, conforme discutido anteriormente. Nesta data, a cultura havia atingido máximo de desenvolvimento e apresentou maior taxa de transpiração, o que justifica a alta FE. Bastiaanssen (2000) verificou FE de 0,4 para cultivos quando estavam em regime de sequeiro e 0,7-0,9 para os mesmos ao fim da estação de irrigação, concluindo que a FE é um bom indicador da umidade do solo na zona radicular e de situações de déficit hídrico. Ahmad et al. (2009) utilizaram a FE como indicador da suficiência do sistema de irrigação em estudos de eficiência do uso da água, identificando FE máxima de 0,8 em cultivos agrícolas irrigados com água de baixa qualidade em região árida do Paquistão.

Valores estimados e medidos dos fluxos não radiativos são apresentados na Tabela 4.7. Seguindo a evolução das medidas tomadas em campo,  $G_{SEBAL}$  foi decaindo do início ao fim do ciclo, concomitante com o desenvolvimento das plantas e aumento da área foliar. O mesmo comportamento é verificado para o fluxo de calor sensível. Em 16 de agosto,  $H_{SEBAL}$  representava 56,7% do saldo de radiação, enquanto que em 17 de setembro, somente 35,5% do saldo foi destinado ao aquecimento do ar. Estes dados demonstram a robustez da calibração do calor sensível pelos pixels quente e frio. À medida do crescimento das plantas na parcela, a temperatura da superfície diminuiu, na mesma

proporção que aumenta a transpiração do dossel e, portanto, o calor latente, atendendo à demanda de transferência de vapor d'água para a atmosfera. O valor baixo de  $H_{SEBAL}$  registrado em 03 de outubro deve-se à escolha do pixel frio, que foi exatamente na parcela 81. Adotou-se esta área como de máxima evapotranspiração, pois nesta data o meloeiro apresentava cobertura do solo superior a 90%, além de ter as necessidades hídricas supridas, condições ideais para escolha do pixel frio.

Ainda na Tabela 4.7 observa-se que, exceto na cena de 17 de setembro,  $H_{SEBAL}$  superestima  $H_{BERB}$  em até 18,6% (01 de setembro). Do contrário,  $G_{SEBAL}$  foi menor que o medido nas três primeiras cenas (subestimativa de 22,9% no dia 17 de setembro). Comportamento semelhante foi registrado por Teixeira et al. (2009a), enquanto que Singh et al. (2008) verificaram que o SEBAL subestimou  $H$  e superestimou  $G$ . Deve-se salientar que os fluxos gerados pelo SEBAL são dados instantâneos, enquanto que os fluxos pelo método BERB referem-se a uma média de 30 minutos das medidas em campo.

Entretanto, apesar dessas flutuações entre valores medidos e estimados de  $G$  e  $H$ , a  $ET_{SEBAL}$  teve boa concordância com a medida em campo. Foi encontrado um erro de 13% entre os dois métodos nas duas primeiras cenas, que podem estar associados às superestimativas da evapotranspiração pelo BERB na fase inicial de crescimento do meloeiro, conforme discutido anteriormente. Nos dois outros dias, a diferença entre SEBAL e BERB não foi além de 2,5%. Teixeira et al. (2009a) reportaram que a  $ET_{24}$  medida no campo pelos métodos BERB e covariância de turbilhões foi 18% superior à estimada pelo SEBAL. Singh et al. (2008) verificaram que  $ET_{SEBAL}$  foi 5% inferior à medida via BERB, apresentando porém erros pontuais de até 28%. Bezerra et al. (2008) verificaram erros

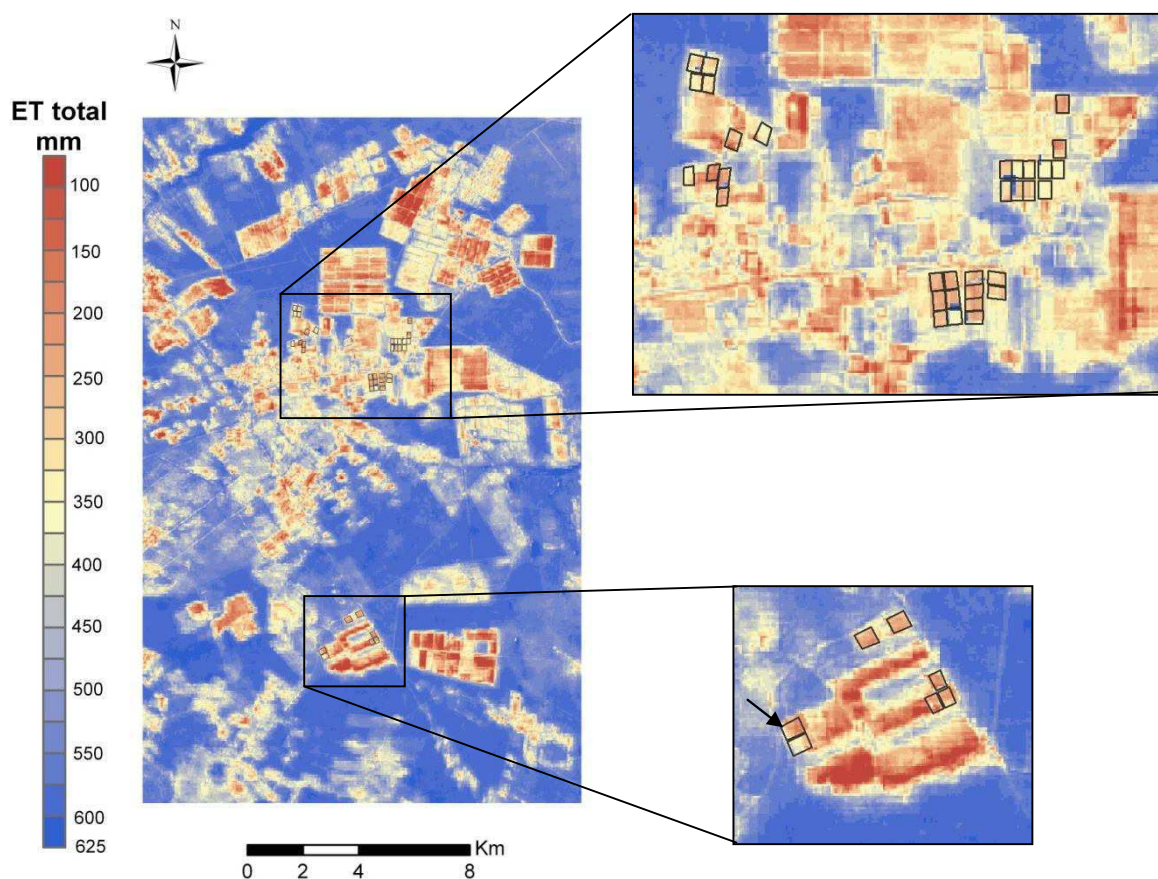
percentuais de 1,9 a 7,1% nas estimativas da  $ET_{SEBAL}$  em campos de algodão e até 9,4% em área de mamona, quando comparadas a razão de Bowen. A partir de medidas da ET da grama em lísimetro, o SEBAL foi validado com erro de apenas 10% (Ramos et al., 2009). Comparativos da ET obtida pelo SEBAL e por medidas de tanque classe A revelaram também boa concordância entre esses métodos, com desvio médio de 10,8% (Sun et al., 2011).

**Tabela 4.7.** Valores medidos pelo BERB e estimados pelo SEBAL dos fluxos de calor no solo (G), sensível (H) e latente (LE) no momento de passagem do satélite e evapotranspiração diária ( $ET_{24}$ ) do meloeiro cultivado na parcela 81 da Fazenda Fruta Vida, Mossoró, 2009.

Data das imagens	$G_{BERB}$	$G_{SEBAL}$	$H_{BERB}$	$H_{SEBAL}$	$LE_{BERB}$	$LE_{SEBAL}$	$ET_{24BERB}$	$ET_{24SEBAL}$
	W m <sup>-2</sup>						(mm)	
16/08/2009	123,4	107,1	266,7	294,8	129,7	117,3	1,5	1,3
01/09/2009	125,3	113,4	215,5	264,7	144,8	127,5	1,6	1,4
17/09/2009	115,0	88,6	226,2	212,1	230,8	296,4	3,8	3,9
03/10/2009	62,2	71,8	-20,3	9,0	561,2	521,9	6,8	6,7

A evapotranspiração total foi gerada para o período de 20 de julho até 27 de outubro de 2009 (Figura 4.15), intervalo que contempla o ciclo de todas as parcelas cultivadas com melão analisadas neste trabalho. A data de plantio/transplante das parcelas ocorreu entre 20 de julho e 19 de agosto, identificando-se quatro ciclos distintos entre as parcelas avaliadas. Desta forma, a  $ET_{sazonal}$  para cada ciclo foi calculada independentemente, utilizando-se as frações ( $ET_{SEBAL\_24}/ET_{0\_24}$ ) adequadas a cada período. Para tanto, considerou-se as mudanças importantes na cobertura do solo, especialmente no tocante ao manejo

das mantas. Quanto às demais áreas, quer sejam as outras parcelas que não foram estudadas ou superfície de Caatinga, o valor de  $ET_{\text{sazonal}}$  corresponde ao total do período (20 de julho a 27 de outubro).



**Figura 4.15.** Evapotranspiração acumulada no período de julho a outubro de 2009, gerada com imagens do TM - Landsat 5 (órbita 216, ponto 63). Em destaque as parcelas das propriedades avaliadas.

O total evapotranspirado pela Caatinga em 99 dias superou 600 mm, muito acima do verificado nas áreas agrícolas. Dois aspectos devem ser considerados: primeiro, o grau de cobertura vegetal da Caatinga não sofreu grandes mudanças de julho a outubro, enquanto que no mesmo período plantas de diferentes idades

estavam em campo, bem como colheitas tinham sido realizadas; segundo, a perda de água na cultura do melão é essencialmente a transpiração das plantas, enquanto que na Caatinga a componente evaporação é atuante, especialmente ao fim de julho, em decorrência das chuvas. Durante o período chuvoso a Caatinga renova-se e torna-se uma vegetação de grande dossel vegetal, e ainda após este período consegue manter as taxas de transpiração por causa da capacidade de buscar água em maiores profundidades.

A evapotranspiração total do meloeiro variou entre 230 e 350 mm nas parcelas analisadas, com valor médio de 288 mm e CV de 27%. Esta variação decorre, entre outros fatores, das diferentes variedades cultivadas e do total de dias do ciclo. Em algumas propriedades as colheitas eram finalizadas com 69 dias após semeadura/transplântio, enquanto que em outras o início da colheita ultrapassou 85 dias. As parcelas cujo ciclo estendeu-se até o fim de outubro apresentaram os maiores valores de ET acumulada, possivelmente por este ser o mês de maior demanda hídrica durante o período estudado. Os valores corroboram com Miranda et al. (2008), que reportou para a Região Nordeste lâmina total de evapotranspiração entre 240 e 350 mm, para meloeiro irrigado por gotejamento, sem uso do *mulch*.

O total da lâmina de evapotranspiração estimada pelo SEBAL para a parcela 81 da Fazenda Fruta Vida foi de 246,8 mm, muito próximo do medido em campo, 256,4 mm. Bastiaanssen et al. (2005) apresentaram resultados da validação do SEBAL por diversos métodos e verificaram que os erros que ocorrem nas estimativas diárias individuais são diluídos e tendem a desaparecer no total estimado para um período. Isto comprova que a extrapolação a partir da  $ET_0$  conduz a estimativas consistentes da evapotranspiração real de um determinado

período. Li et al. (2008) verificaram que a evapotranspiração sazonal gerada pelo SEBAL foi bastante próxima às medidas de lisímetro, havendo superestimativa de apenas 4,3%. Zwart e Bastiaanssen (2007) obtiveram ET acumulada em 110 dias pelo SEBAL com 8,8% de superestimativa em relação à medida por correlação de vórtices turbulentos. Utilizando o SEBAL e dados de balanço hídrico para determinar a evapotranspiração anual, Mutiga et al. (2010) conseguiram correlação de 70% entre os métodos. Validações da evapotranspiração sazonal com cintilômetro de grande abertura também confirmaram a acurácia do SEBAL (Kongo et al., 2011). A diferença de 5% encontrado no presente trabalho está dentro do erro considerável aceitável para as estimativas da ET a partir de imagens orbitais, que é 10% (Bastiaanssen et al., 1998b, Bastiaanssen, 2000).

#### **4.3. Produtividade e uso da água**

A região Nordeste do Brasil é bastante promissora para cultivos agrícolas no tocante à quantidade de radiação solar incidente e temperatura do ar alta todo o ano, o que proporciona às culturas alto potencial de otimização da energia solar em biomassa e, portanto, produção econômica. A produção agrícola nesta região é praticamente dependente do suprimento hídrico via irrigação, o que torna imperiosa a análise do emprego da água nesta atividade.

Dados da produção do meloeiro em função do uso da água pela cultura são apresentados na Tabela 4.8. Os valores de produção e água aplicada são a soma das parcelas avaliadas em cada propriedade neste estudo.

A produtividade de água do meloeiro em função da irrigação total -  $PA_{IR}$  variou consideravelmente dentro de uma mesma propriedade. Coeficiente de

variação (CV) de 41% foi registrado nos dados coletados na Fazenda Norfruit, com desvio padrão de  $2,75 \text{ kg m}^{-3}$ . A parcela de número 13 desta propriedade, cultivada com melão Amarelo apresentou  $PA_{IR}$  de  $12,2 \text{ kg m}^{-3}$ , enquanto que nas parcelas 10 e 20, com variedade Gália,  $PA_{IR}$  foi 3,4 e  $3,2 \text{ kg m}^{-3}$ , respectivamente. Parte da variação na  $PA_{IR}$  deve-se ao diferente peso dos frutos das variedades. Entretanto, na Fazenda Brazil Melon, as parcelas foram cultivadas com as variedades Amarelo e Gália e o desvio padrão dos dados foi  $0,75 \text{ kg m}^{-3}$ , com CV de 13,5%. Nas Fazendas Fruta Vida e Dinamarca, o CV foi 17,8% e 24,7%, respectivamente. Destaca-se nesta última propriedade a parcela 31, com melão Gália, com  $PA_{IR}$  de  $7,35 \text{ kg m}^{-3}$ . Portanto, a variabilidade encontrada não se deve apenas à variedade cultivada, mas a outros aspectos, quer sejam fertilidade do solo, problemas de fitossanidade ou problemas na uniformidade de irrigação (entupimento de emissores, vazamentos, pressão de funcionamento inadequada).

Em termos de quantidade de água consumida para produzir 1 kg de fruto, verificou-se que são gastos, em média, 121 L na Fruta vida, 172 L na Norfruit, 184 L na Brazil Melon e 207 L na Dinamarca. Considerando que os frutos de melão pesam em torno de 2 a 3 kg,  $1 \text{ m}^3$  de água aplicada é consumida para produzir cerca de 2 frutos. Pesquisas realizadas por Teixeira et al. (2009b) no perímetro Irrigado Juazeiro-Petrolina revelaram que são gastos, em média, 357,14 L para produzir 1 kg de uva de mesa e 294 L para produzir 1 kg de fruto de manga, considerando o montante de água consumida (evapotranspirada) por estas culturas. Alta variabilidade da produtividade de água foi encontrada neste estudo, com  $CV > 30\%$  em todas as épocas e propriedades avaliadas.



**Tabela 4.8.** Produtividade agrícola ( $PA_{IR}$ ) e monetária (PMA) da água, com base na irrigação, das parcelas avaliadas nas empresas agrícolas Dinamarca, Brazil Melon, Norfruit e Fruta Vida (Mossoró – RN, ano 2009).

Fazenda	Área total (ha)	Prod. total (toneladas)	Valor da produção (US\$)	Irrigação ( $m^3$ )	$PA_{IR}$ ( $kg\ m^{-3}$ )	PMA ( $US\$m^{-3}$ )
Dinamarca	24,3	638,24	414.856,00	123.329,13	5,11	3,36
Brazil Melon	39,0	1108,64	720.616,00	200.971,8	5,54	3,59
Fruta Vida	25,0	656,11	426.472,00	83.466,00	8,47	5,11
Norfruit	30,1	1131,68	735.592,00	169.072,37	6,77	4,35

Coeficientes de variação elevados estão associados à desuniformidade no uso da água e baixos índices de produtividade (Zwart e Bastiaanssen, 2007; Karatas et al., 2009). Os produtos de sensoriamento remoto são poderosas ferramentas na identificação destes problemas em escala espacial e na concepção de estratégias que aumentem o uso benéfico da água, as quais devem ser implementadas segundo a realidade de cada propriedade.

Os maiores valores de  $PA_{IR}$  foram encontrados na Fazenda Fruta Vida, onde uma menor quantidade de água foi aplicada durante o ciclo. Este resultado deve-se primeiramente ao sistema de irrigação montado, no que refere ao espaçamento entre gotejadores (0,5 m) e entre linhas de gotejadores (2,0 m). Tal arranjo proporcionou para cada gotejador uma área de 1,0  $m^2$ , maior que a área de cada emissor nos outros sistemas. As outras propriedades tinham uma disposição diferente do sistema, com diversos espaçamentos entre gotejadores e linhas (Tabela 3.8). Para um mesmo período de aplicação, com mesma vazão entre gotejadores, maior quantidade de água é derivada em solo no qual os emissores estão em menor espaçamento. Além deste fato, na Fazenda Fruta Vida

foi realizada apenas uma colheita em cada parcela, cessando-se a irrigação logo após. Nas demais empresas fazem-se o chamado “repassé” da colheita, uma, duas e até três semanas após o início da mesma. Durante todo esse período a irrigação é mantida.

Apesar do total de água aplicada ser inferior ao registrado na Brazil Melon e na Norfruit, a  $PA_{IR}$  da Fazenda Dinamarca não superou as demais. Um manejo diferenciado durante o período de crescimento das plantas sob a manta pode explicar esta ocorrência: nesta fase, a irrigação é suspensa por dois ou três dias, não consecutivos. O solo da Fazenda Dinamarca apresenta 81% de areia, conforme resultados de análises realizadas no Laboratório de Irrigação e Salinidade da UFERSA. A combinação da grande demanda evaporativa da região com a alta infiltração do solo pode causar estresse hídrico às plantas, haja vista que as mantas são porosas e permitem troca de vapor com o ambiente.

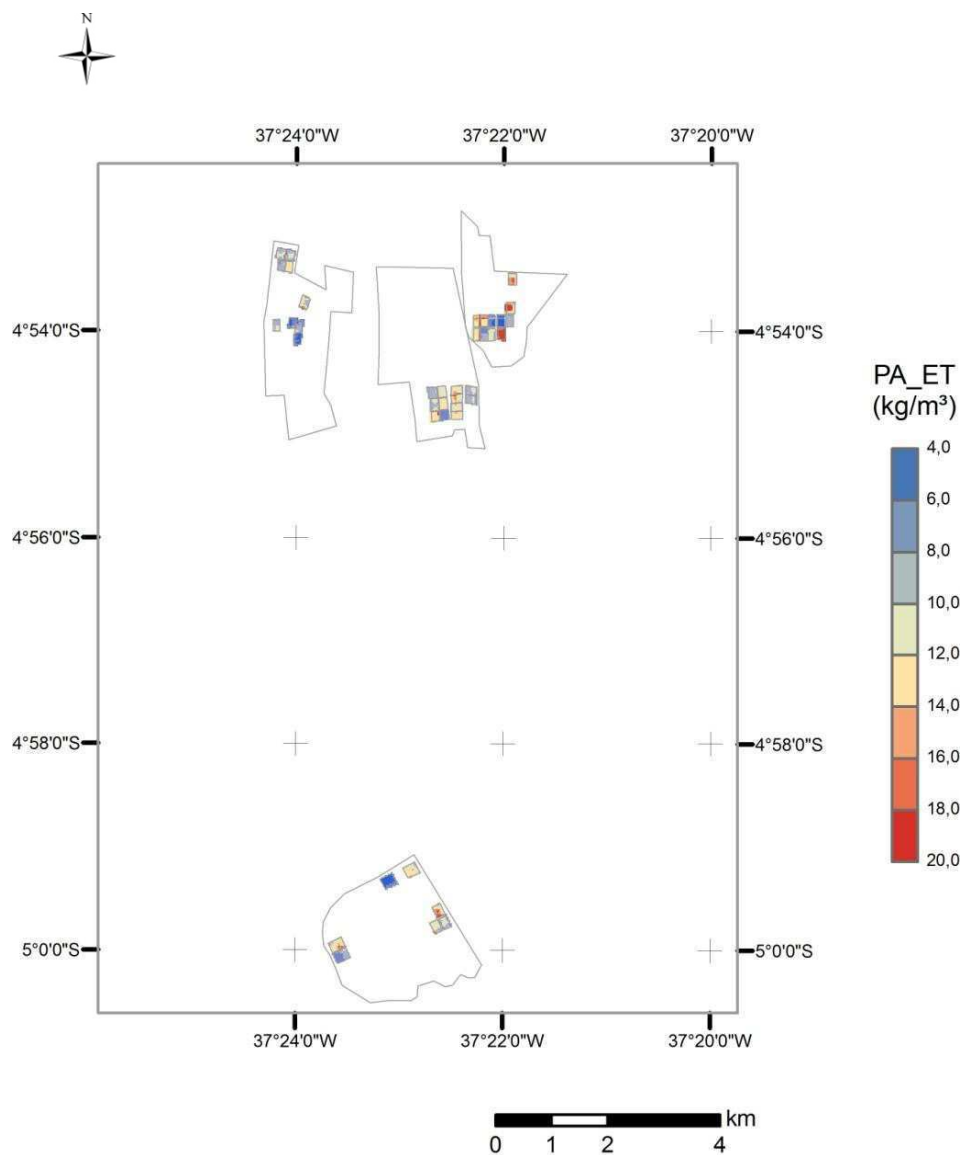
A produtividade de água também foi calculada em termos financeiros, dividindo o total de valores brutos gerados pela comercialização dos frutos de melão pela quantidade de água aplicada para produzi-los. Considerando-se o valor médio bruto de 0,65 US\$  $kg^{-1}$  de melão (informação dos produtores), a produtividade monetária de água (PMA) variou de 3,36 a 5,11 US\$  $m^{-3}$ , com média de 4,1 US\$  $m^{-3}$  e desvio padrão de 0,79 US\$  $m^{-3}$ , conforme é apresentado na Tabela 4.8. Valores próximos foram reportados por Teixeira et al. (2009b), que encontraram para a uva, principal fruteira na pauta das exportações brasileiras, PMA variando entre 3,74 a 8,80 US\$  $m^{-3}$  e para mangas PMA de 2,24 a 5,10 US\$  $m^{-3}$ , considerando a água consumida por evapotranspiração.

A PMA determinada para o melão supera o valor financeiro da produtividade de água de muitas culturas já avaliadas. Na Bacia do Rio Amarelo (China),

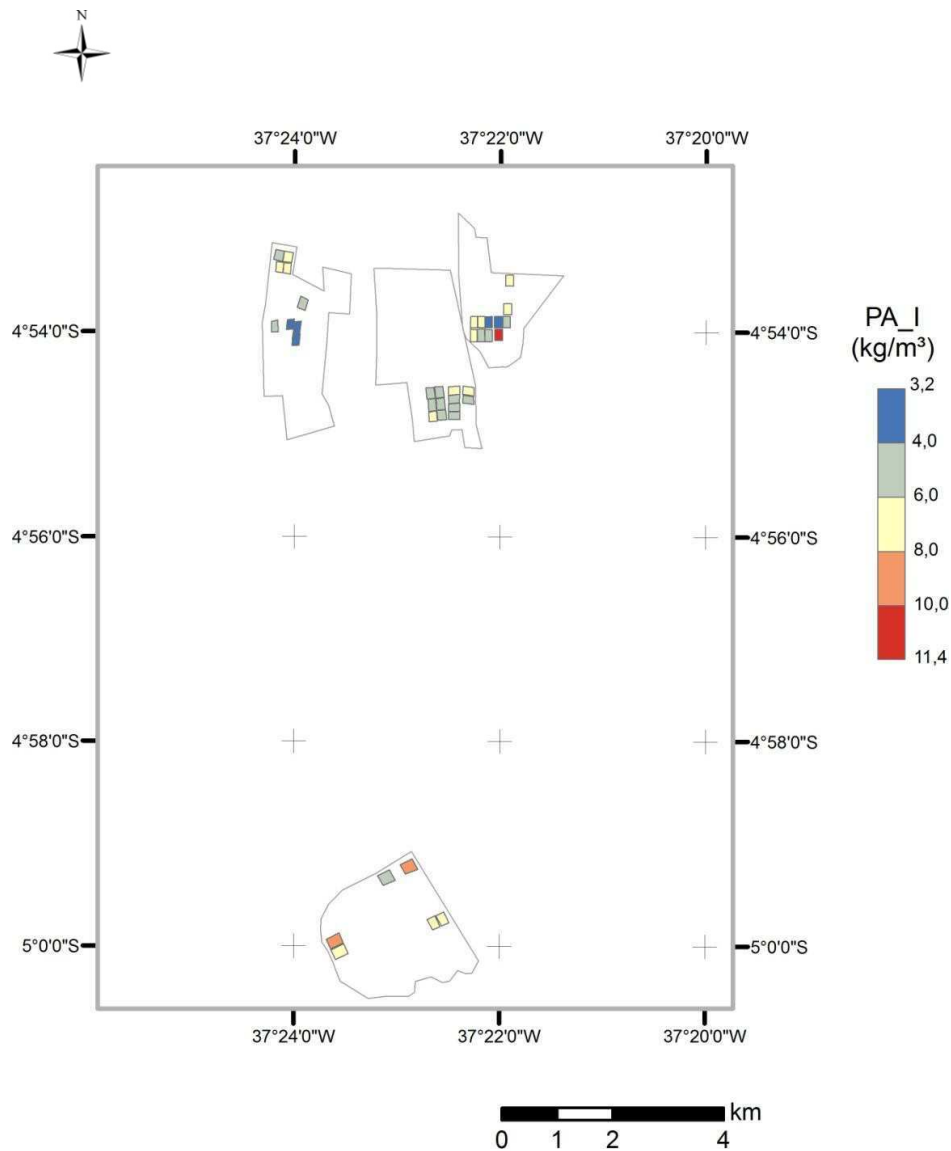
analisando áreas cultivadas de arroz, trigo, milho e soja, Cai et al. (2011) registraram PMA de até 1,6 US\$ m<sup>-3</sup>. Ahmad et al. (2009) encontraram o valor máximo de 0,12 US\$ m<sup>-3</sup> para áreas produtoras de arroz e trigo, em sistema de irrigação por canais com água de boa qualidade no Paquistão. Yokwe (2009), analisando dois distritos de irrigação na África do Sul, verificaram PMA máximas de 0,28 US\$ m<sup>-3</sup> para tomateiros em irrigação de superfície e 0,21 US\$ m<sup>-3</sup> em cultivo de repolho irrigado por aspersores. Estes resultados enfatizam a importância econômica do negócio do melão como gerador de renda e empregos, contribuindo para a fixação da população rural no seu local de origem. Mossoró, que é pólo produtor da segunda fruteira em importância nas exportações, é um bom exemplo do potencial do semiárido nordestino como promissora região de desenvolvimento agrícola.

Quando determinada com base na evapotranspiração da cultura, a produtividade de água -  $PA_{ET}$  (Figura 4.16) foi superior à  $PA_{IR}$  (Figura 4.17), variando de 4 kg m<sup>-3</sup> (Fazenda Dinamarca) a 20 kg m<sup>-3</sup> (fazenda Norfruit). Valores de  $PA_{ET} > PA_{IR}$  indicam que nem toda água aplicada à planta foi efetivamente utilizada no processo de evapotranspiração. Demais fenômenos do sistema solo-planta-atmosfera tais como escoamento superficial e percolação profunda, são negligenciados quando o uso da água pelas culturas é avaliado apenas pela lâmina evapotranspirada. Além dessas “perdas” da água, deve-se incluir aspectos relativos ao sistema de irrigação, quer sejam vazamentos, evaporação de gotículas em sistemas aspersores e aplicação desuniforme. Possivelmente pela dificuldade de coleta de dados do manejo de irrigação em propriedades agrícolas, muitas pesquisas de produtividade de água vêm sendo realizadas com base

apenas em dados de evapotranspiração, com resultados que podem não refletir verdadeiramente como a água é empregada na produção.



**Figura 4.16.** Produtividade de água, com base na evapotranspiração da cultura (PA<sub>ET</sub>), do meloeiro cultivado no ano de 2009 em Mossoró – RN.

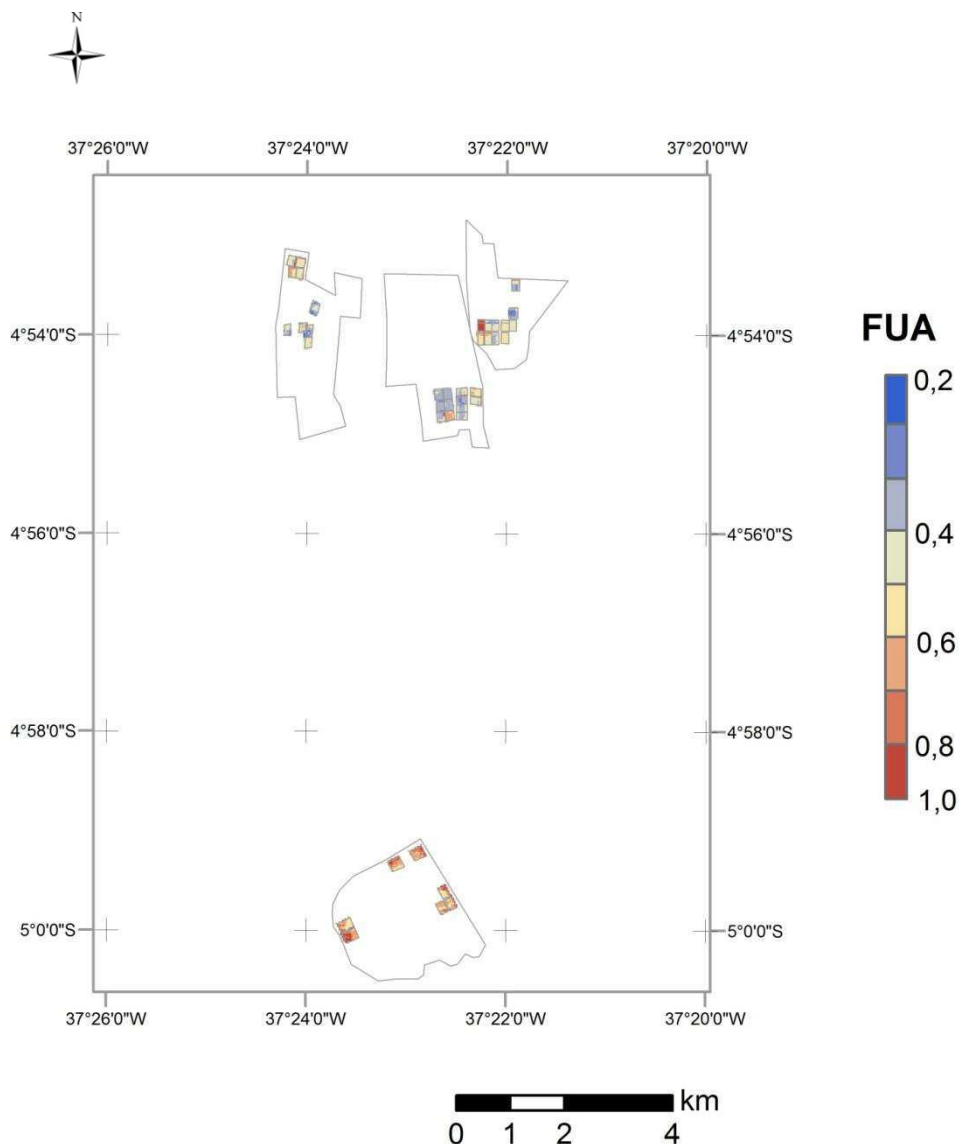


**Figura 4.17.** Produtividade de água, com base na irrigação ( $PA_{IR}$ ), do meloeiro cultivado no ano de 2009 em Mossoró - RN.

A fração de uso da água (FUA) determinada na área de estudo (Figura 4.18) corrobora o que foi afirmado anteriormente. A FUA evidencia o quanto da água fornecida às plantas (por irrigação e precipitação) foi efetivamente usado no seu crescimento, ou seja, no processo de evapotranspiração. A menor FUA foi de 0,3, ocorrendo alguns poucos pixels abaixo deste valor. Isto significa que apenas 30% da água aplicada foi transpirada, ou seja, 70% do volume total foi perdido em

outros processos. Provavelmente a água que não é utilizada pelas plantas é percolada no perfil do solo, pois perdas com evaporação e escoamento superficial são praticamente inexistentes no sistema de cultivo em questão, exceto quando ocorrem precipitações. Valores entre 0,4 e 0,5 foram bastante ocorrentes na Fazenda Brazil Melon, associados á baixa  $PA_{IR}$  encontradas nas respectivas parcelas. Nas parcelas da Fruta Vida, a FUA situou-se acima de 0,7, significando que a aplicação foi adequada às exigências das plantas sem, contudo, promover alta percolação. Um total de 235.541 m<sup>3</sup> foi drenado, referente à fração de uso da água média para todas as parcelas igual a 0,61 (CV = 29%). Bastiaanssen et al. (2001) sugeriram, para regiões semiáridas, valores aceitáveis de FUA entre 0,6 e 1,1. Abaixo deste intervalo configuram-se aplicações muito acima do necessário, com consequentes perdas de água no sistema e acima de 1,1 pode-se indicar uma situação de déficit hídrico.

Baixos valores de FUA são reportados em diversos trabalhos (Bastiaanssen et al., 2001; Khan et al., 2008; Ahmad et al., 2009; Karatas et al., 2009), mostrando que este é um problema recorrente em muitos perímetros irrigados no mundo. Lecina et al. (2011) comprovaram que melhorias no manejo e infraestrutura da irrigação elevaram o consumo benéfico da água em áreas irrigadas da Bacia do Rio do Urso (Estados Unidos da América), promovendo aumento da FUA de 0,86 a 0,97. No Distrito de Irrigação Jaguaribe-Apodi, estado do Ceará, Folhes et al. (2009) constataram que o manejo da irrigação com déficit contribuiu para que a FUA fosse em torno de 0,8. Segundo esses autores, o alto custo da captação da água motivou os produtores a reduzir os volumes aplicados.



**Figura 4.18.** Fração de Uso da Água (FUA) do meloeiro cultivado no ano de 2009 em Mossoró - RN.

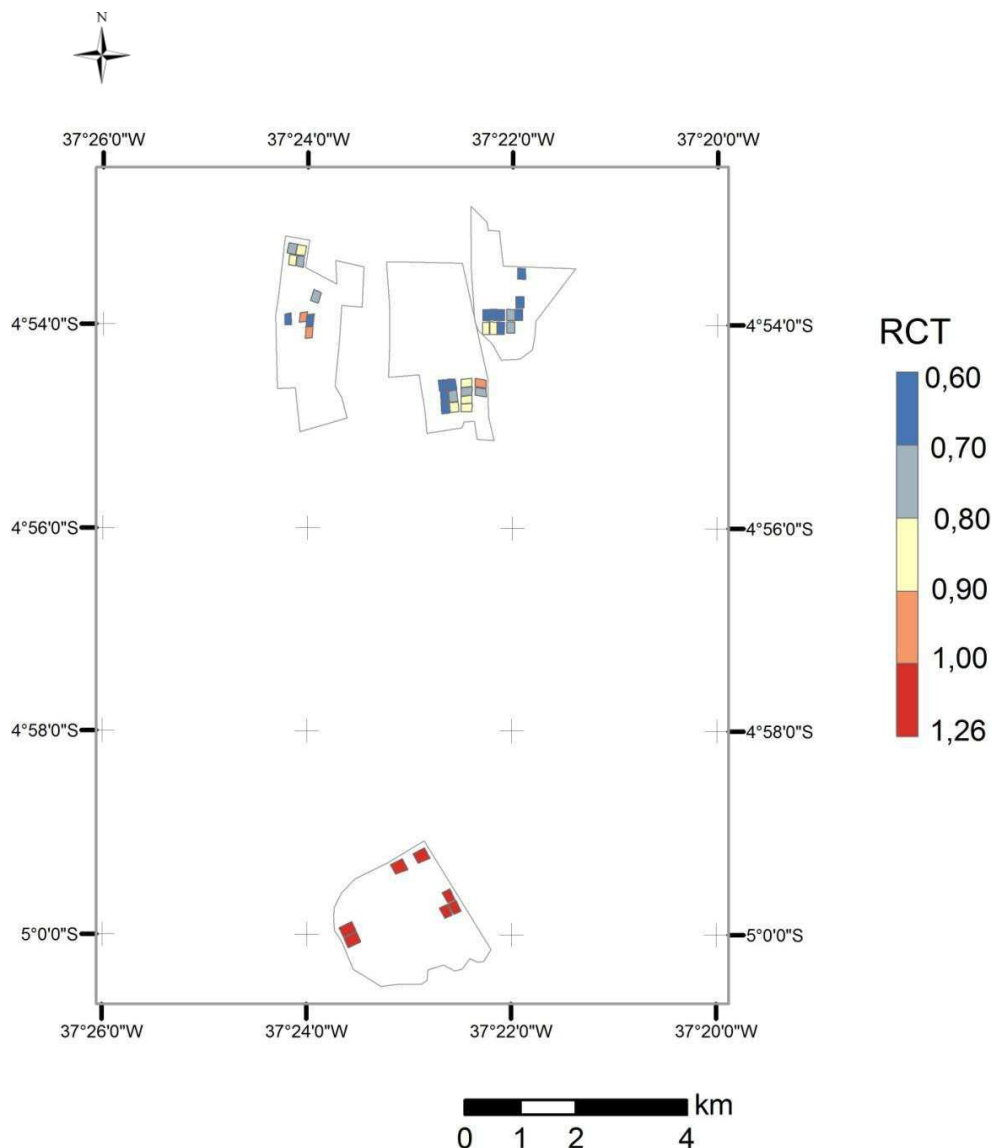
Em cultivos dependentes de chuvas, a FUA varia bastante, e indica mudanças no uso da água pelas plantas (Karatas et al., 2009). Para cultivos irrigados, a FUA pode ser manejada de forma a atender a necessidades das culturas e de conservação do solo. Deve-se considerar a necessidade de adotar fração de lixiviação na lâmina de irrigação do meloeiro, por causa da aplicação de fertilizantes por essa via. Caso essa prática seja negligenciada, problemas de

salinidade podem ser facilmente detectados, em decorrência da própria qualidade da água de irrigação. Entretanto, é necessário estabelecer a fração de lixiviação adequada, pois, ao contrário, pode haver uma percolação dos fertilizantes no perfil do solo. Além de consequências na produção da cultura, tem-se a contaminação dos aquíferos subterrâneos com adubos e também resíduos de pesticidas.

A fração de uso da água pelo meloeiro considerando que não há déficit hídrico é representada pela Razão de Consumo Total - RCT (Figura 4.19). Mesmo em situação de máxima demanda, representada pela  $ET_0$ , em algumas parcelas o consumo da água aplicada foi inferior a 70%. Uma medida para aumentar o consumo benéfico da água seria reduzir a água derivada a estas parcelas, o que contribuiria para minimizar o bombeamento de mais volumes das fontes subterrâneas. Se a água subterrânea captada para irrigação supera o volume de recarga, os lençóis freáticos diminuem, com consequente aumento dos custos de bombeamento a um ponto crítico de tornar o recurso muito caro para a produção, ou ainda tornar as reservas subterrâneas indisponíveis. Mesmo quando o excesso de água aplicado é percolado no solo, pode ocorrer um déficit no suprimento dos lençóis, pois a velocidade de bombeamento pode superar a de recarga.

As parcelas da Fruta Vida tiveram  $RCT > 1$ , o que indica uma insuficiência do sistema na condição de atender à evapotranspiração potencial. Contudo, conforme as determinações de campo, a demanda hídrica do meloeiro chega ao máximo de  $0,98 ET_0$  apenas na fase de crescimento dos frutos. Portanto, nos demais estádios  $RCT > 1$  não necessariamente se configura em déficit hídrico. Esta situação é válida desde que a lâmina aplicada possa atender aos requisitos da eficiência do sistema e considere a necessidade de fração para lixiviação.





**Figura 4.19.** Razão de consumo total (RCT) do meloeiro cultivado no ano de 2009 em Mossoró – RN.

O suprimento hídrico relativo (SHR) é uma razão inversamente proporcional à RCT e indica a suficiência do sistema em fornecer água às plantas adequadamente. Para a área estudada, o suprimento de água foi capaz de atender às máximas exigências hídricas das plantas, exceto nas já citadas parcelas da Fazenda Fruta Vida (Figura 4.20). Entretanto,  $SHR > 1,0$  indicam perdas de água, como também foi registrado por Bastiaanssen et al. (2001). O SHR é um bom indicador para avaliar a uniformidade de aplicação de água em



sejam realizadas manutenção de filtros e dos emissores. A irrigação por gotejamento também está associada a maiores produtividades e possibilidade de uso de água salina (Bernardo, 2009). Agregado a estas vantagens, o uso do mulch plástico aumenta o consumo “benéfico” da água (Perry et al., 2009). Wang et al. (2011) concluíram que o uso de *mulch* plástico juntamente com cobertura de cascalhos, em produção de melancia, reduziu a perda de água por escoamento superficial, como também contribuiu para aumento da produtividade agrícola da água. Tais técnicas contribuem para conservação da água, visto que a evaporação pode ser considerada verdadeira perda deste recurso no sistema, pois o vapor d’água ali gerado pode vir a condensar e precipitar em outro local.

## 5. CONCLUSÕES

1. A metodologia do Balanço de Energia pela razão de Bowen (BERB) possibilitou a obtenção da evapotranspiração e de coeficientes de cultivo compatíveis com a tradicional metodologia do Manual 56 da FAO para Irrigação e Drenagem. Entretanto, houve divergência entre os métodos na fase inicial da cultura, o que proporcionou a  $ET_{BERB}$  total ser 12% maior que  $ET_{FAO}$ .
2. A evapotranspiração determinada pelo BERB para todo ciclo da cultura do meloeiro foi de 256,44 mm na P81 e 273,31 mm na P35. Os coeficientes de cultivo gerados pelo método BERB foram, para os estádios inicial, médio e final: 0,25, 0,98 e 0,62 (P81) e 0,26, 0,94 e 0,64 (P53).
3. A modelagem da evapotranspiração do meloeiro cultivado com *mulch* pelo SEBAL promoveu resultados consistentes, com diferença máxima de 13% dos dados medidos em campo;
4. A produtividade de água variou bastante entre as propriedades e dentro das mesmas, possivelmente pelas diferenças no manejo de irrigação, variedades cultivadas e situação fitossanitária das plantas. A  $PA_{IR}$  média de toda região estudada foi  $6,47 \text{ kg m}^{-3}$ .

5. Em termos monetários, o cultivo de melão na região apresentou alta produtividade de água, com média de 4,41 US\$ m<sup>-3</sup>, considerando o volume aplicado na produção.
6. O suprimento relativo da água foi satisfatório, entretanto grandes perdas por percolação foram registradas. A fração de uso de água média foi de 0,61, referente ao valor total de 235.541 m<sup>3</sup> de água drenados.

## 6. SUGESTÕES

1. O uso do *mulch* contribui para aumentar o consumo benéfico da água. Contudo, algumas medidas podem ser adotadas para aumentar a produtividade de água nesta região: definição da fração de lixiviação adequada à qualidade da água e adubos utilizados; adequar as irrigações às necessidades das plantas em cada estágio, utilizando o  $K_c$  correspondente e definir como lâmina de irrigação máxima a  $ET_0$  mais a fração de lixiviação.
2. Sugere-se como pesquisas futuras a aplicação do método BERB com objetivo de analisar a influência do *mulch* e da manta de polietileno nos fluxos à superfície, em comparação com cultivo sem *mulch*. Outra sugestão é avaliar a produtividade e a qualidade dos frutos de melão em experimento que aplique as lâminas de irrigação de acordo com os coeficientes de cultivo gerados no presente trabalho, adicionando-se a fração de lixiviação quando necessário.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, M. D.; TURRAL, H.; NAZEER, H. Diagnosing irrigation performance and water productivity through satellite remote sensing and secondary data in a large irrigation system of Pakistan. **Agricultural Water Management**, v.96, p.551-564, 2009.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998. **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Roma, 300 p.

ALLEN, R. G., TREZZA, R. & TASUMI M. **Surface energy balance algorithms for land**. Advance training and user's manual, version 1.0, 2002, 98p.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **Irrigation and Drainage Systems**, v.19, p.251-268, 2005

ALLEN, R. G., TASUMI, M., TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, p.380-394, 2007.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v.98, p.899-920, 2011.

ANGELOTTI, F. e COSTA, N. D. **Sistema de produção de melão: Clima**. Versão eletrônica, ago. 2010. Disponível em < <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Melao/SistemaProducaoMelao/clima.html> >. Acessado em: 30 de junho de 2010.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. SanDiego: Academic Press, 1988. 307 p.

AZEVEDO, P. V. de; SILVA, B. B. da; SILVA, V. P. R. da. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v.58, p.241–254, 2003.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.198-212, 1998.

BASTIAANSSEN, W. G. M; PELGRUM, H.; WAG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J. WAL, T. van der. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.213-229, 1998.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MOLDEN, D. J. MAKIN, I. W. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. **Agricultural Water Management**, v.42, p.137-155, 2000.

BASTIAANSSEN, W. G. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p.87-100, 2000.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; BRITO, R. A. L.; BOS, M. G.; SOUZA, R. A.; CAVALCANTI, E. B.; BAKKER, M. M. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. **Irrigation and Drainage Systems**, v.15, p.53-79, 2001.



BASTIAANSSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.94, p.321-340, 2003.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, p.85-93, 2005.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. Viçosa: Ed. UFV. 8 ed., 2009. 625 p.

BEZERRA, A. H. F.; LEVIEN, S. L. A.; PEIXOTO, T. D. C. Determinação de Kc de melão e melancia utilizando os softwares SingleKcSIM e DualKcSIM. **Enciclopédia Biosfera**, v.6, p.1-9, 2004.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens Digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, p.305-317, 2008.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; BEZERRA, J. R. C.; BRANDÃO, Z. N. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, p.404-414, 2010.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; SILVA, B. B. Mapeamento e quantificação de parâmetros biofísicos e radiação líquida em área de algodoeiro irrigado. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, p.485-493, 2010.

BOS, M. G. Performance Indicators for irrigation and drainage. **Irrigation and Drainage Systems**, v.11, p.119-137, 1997.

BOTÍA, P.; NAVARRO, J. M.; CERDÁ, A., MARTINEZ, V. Yield and fruit quality of two melon cultivars irrigated with saline water at different stages of development. **European Journal of Agronomy**, v.23, p.243-253, 2005.

BOWEN, J. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, v.27, p.779–787, 1926.

BROUWER, C.; HEIBLOEM, M. **Irrigation water needs**. Irrigation Water Management. Training Manual (FAO), nº 3. Roma: FAO, 1986, 60 p.

CAI, X.; YANG, Y.E.; RINGLER, C.; ZHAO, J.; YOU, L. Agricultural water productivity assessment for the Yellow River Basin. **Agricultural Water Management**, v.98, p.1297-1306, 2011.

CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; CALERA, A.; BALBONTÍN, C.; GONZALEZ-PIQUERAS, J. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). **Agricultural Water Management**, v.98, p.45-54, 2010.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; BARSÍ, J. A. Revised Landsat-5 Thematic Mapper radiometric calibration. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v.4, p.490-494, 2007.

COSTA, N. D; GRANGEIRO, L. C. **Sistema de produção de melão: Cultivares**. Versão eletrônica, ago. 2010. Disponível em <  
<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Melao/SistemaProducaoMelao/cultivares.html> > Acessado em: 30 de junho de 2010.

COURAULT, D.; SEGUIN, B.; OLIOSO, A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. **Irrigation and Drainage Systems**, v.19, p.223-248, 2005.

CRAGO, R.; BRUTSAERT, W. Daytime evaporation and the self-preservation of the evaporative fraction and the Bowen ratio. **Journal of Hydrology**, v.178, p.241-255, 1996.

DALMOLIN, R. S. D.; GONCALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, v.35, p.481-489, 2005.

DE BRUIN, H. A. R.; STRICKER, J. N. M. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. **Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 45, p.391-406, 2000.

DEMATTE, J. A. M.; TOLEDO, A. M. A.; SIMÕES, M. S. metodologia para reconhecimento de três solos por sensores: laboratorial e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.877-889, 2004.

DOORENBOS, J. e PRUITT. W. O., 1992. **Crop Water Requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 24, Roma, 144p.

DUFFIE, J. A. e BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal process**. 2.ed, John Wiley and sons: Nova Iorque, 1991.

FARAH, O. H.; BASTIAANSEN, W. G. M.; FEDDES, R. A. Evaluation of the temporal variability of the evaporative fraction in a tropical watershed. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 5, p.129-140, 2004.

FIGUEIRÊDO, M. C. P.; ROSA, M. F.; GONDIM, R. S.; FREITAS, J. A. Questões ambientais no cultivo do melão. In: SOBRINHO, R. B; GUIMARÃES, J. A.; FREITAS, J. A. D.; TERAPO, D. (org.). **Produção integrada do melão**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, Banco do Nordeste do Brasil, 2008.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa: UFV, 2000. 402p.

FOLHES, M. T.; RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1398-1408, 2009.

FRITSCHEN, L. J. E FRITSCHEN, C. L. Bowen Ratio Energy Balance Method. In: VINEY, M. K. (ed.). **Micrometeorology in Agricultural Systems. Agronomy Monograph nº 47**. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2005. 584p.

GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v.52, p.127-140, 2007.

GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1275-1284, 2009.

GIMENEZ, C. OTTO, R. F.; CASTILLA, N. Productivity of leaf and root vegetables crops under direct cover. **Scientia Horticulturae**, v.91, p.1-11, 2002.

GOWDA, P. H.; CHAVEZ, J. L.; COLAIZZI, P. D.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; TOLK, J. A. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. **Irrigation Science**, v.26, p.223-237, 2008.

HERNANDEZ-HAMIREZ, G.; HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H.; SAUER, T. J. energy balance and turbulent flux partitioning in a corn-soybean rotation in the Midwestern US. **Theoretical and Applied Meteorology**, v.100, p.79-92, 2010.

HOU, L. G.; XIAO, H. L.; SI, J. H.; XIAO, S. C.; ZHOU, M. X.; YANG, Y. G. Evapotranspiration and crop coefficient of *Populus euphratica* Olive forest during

the growing season in the extreme arid region northwest China. **Agricultural Water Management**, v.97, p.351–356, 2010.

HUETE, A. R. Adjusting Vegetation Indices for Soil Influences. **International Agrophysics**. v.3, p.367-376, 1988.

IBGE. **Produção agrícola municipal**. disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2008/tab1.pdf>. Acessado em 14 de junho de 2010.

IBRAF. **Comparativo das exportações de frutas frescas – 2010**. Disponível em: <[http://www.ibraf.org.br/estatisticas/Exporta%C3%A7%C3%A3o/Comparativo\\_das\\_Exporta%C3%A7%C3%B5es\\_Brasileiras\\_de\\_Frutas\\_frescas\\_2010-2009.pdf](http://www.ibraf.org.br/estatisticas/Exporta%C3%A7%C3%A3o/Comparativo_das_Exporta%C3%A7%C3%B5es_Brasileiras_de_Frutas_frescas_2010-2009.pdf)>. Acessado em: 02 de julho de 2011.

IMMERZEEL, W. W.; GAUR, A.; ZWART, S. J. Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. **Agricultural Water Management**, v.95, p.11-24, 2008.

INMAN-BAMBER, N. G.; MCGLINCHEY, M. G. Crop-coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v.83, p.125–138, 2003.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=tmax>>. Acessado em: 15 de agosto de 2011.

JARA, J.; STOCKLE, C. O.; KJELGAARD, J. Measurement of evapotranspiration and its components in a corn (*Zea mays* L.) field. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.92, p.131-145, 1998.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. 328p.

KARATAS, B. S.; AKKUZU, E.; UNAL, H. B.; ASIK, S.; AVCI, M. Using satellite remote sensing to assess irrigation performance in water user associations in the Lower Gediz Basin, Turkey. **Agricultural Water Management**, v.96, p.982-990, 2009.

KHAN, S. K.; HAFEEZ, M. M.; RANA, T.; MUSHTAQ, S. Enhancing water productivity at the irrigation system level: A geospatial hydrology application in the Yellow River Basin. **Journal of Arid Environments**, v.72, p.1046-1063, 2008.

KIMURA, R.; BAI, L.; FAN, J.; TAKAYAMA, N.; HINOKIDANI, O. Evapo-transpiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. **Journal of Arid Environments**, v.68, p.53-65, 2007.

KONGO, M. V.; JEWITT, G. W. P.; LORENTZ, S. A. Evaporative water use of different land uses in the upper-Thukela river basin assessed from satellite imagery. **Agricultural Water Management**, v.98, p.1727-1739, 2011.

LECINA, S.; NEALE, C. M. U.; MERKLEY, G. P.; SANTOS, C. A. C. Irrigation evaluation based on performance analysis and water accounting at the Bear River Irrigation Project (U.S.A.). **Agricultural Water Management**, v.98, p.1349- 1363, 2011.

LEE, X.; YU, Q.; SUN, X.; LIU, J.; MIN, Q.; LIU, Y.; ZHANG, X. Micrometeorological fluxes under the influence of regional and local advection: a revisit. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.122, p.111-124, 2004.

LEGATES, D. R.; MCCABE JR., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v.35, p.233-241, 1999.

LI, H.; ZHENG, L.; LEI, Y.; LI, C.; LIU, Z.; ZHANG, S. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain

using remote sensing technology. **Agricultural Water Management**, v.95, p.1271-1278, 2008.

LOVELLI, S.; PIZZA, S.; CAPONIO, T.; RIVELLI, A. R.; PERNIOLA, M. Lysimetric determination of muskmelon crop coefficients cultivated under plastic *mulches*. **Agricultural Water Management**, v.72, p.147–159, 2005.

LUCENA, A. A. **Calibração do balanço de radiação diário através de dados de superfície e de sensores orbitais**. 114p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2010.

MARKHAM, B. L. & BARKER, J. L. Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, p.517-523, 1987.

MASCARENHAS, J. C.; BELTRÃO, B. A.; SOUZA JUNIOR, L. C.; PIRES, S. T. M.; ROCHA, D. E. G. A.; CARVALHO, V. G. D. (org.) **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: Diagnóstico do município de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 44p.

MEDEIROS J. F.; LISBOA, R. A.; OLIVEIRA, M.; SILVA JUNIOR, M. S.; ALVES, L. P. Caracterização das águas subterrâneas usadas para irrigação na área produtora de melão da Chapada do Apodi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, p.469-472, 2003.

MEDEIROS J. F.; SANTOS S. C. L.; CÂMARA, M. J. T.; NEGREIROS, M. Z. Produção de melão Cantaloupe influenciado por coberturas do solo, agrotêxtil e lâminas de irrigação. **Horticultura Brasileira**, v.25, p.538-543, 2007.

MIRANDA, F. R.; SOUZA, F. de; RIBEIRO, R. S. F. Estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultivo para a cultura do melão plantado na região litorânea do estado do Ceará. **Engenharia Agrícola**, v.18, p.63-70, 1999.

MIRANDA, F. R.; GONDIM, R. S.; FREITAS, J. A. D.; PINHEIRO NETO, L. G. Irrigação do Meloeiro. In: SOBRINHO, R. B; GUIMARÃES, J. A.; FREITAS, J. A. D.; TERAQ, D. (org.). **Produção integrada do melão**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, Banco do Nordeste do Brasil, 2008.

MORAIS, E. R. C.; MAIA, C. E.; NEGREIROS, M. Z.; ARAÚJO JUNIOR, B. B.; MEDEIROS, J. F. Crescimento e produtividade do meloeiro Goldex influenciado pela cobertura do solo. **Scientia Agricola**, v.9, p.129-137, 2008.

MUTIGA, J. K.; SU, Z.; WOLDAI, T. Using satellite remote sensing to assess evapotranspiration: Case study of the upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.12S, p.S100-S108, 2010.

NEGREIROS, M. Z.; COSTA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; LEITÃO, V. B. R. M. M.; BEZERRA NETO, F.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Rendimento e qualidade do melão sob lâminas de irrigação e cobertura do solo com filmes de polietileno de diferentes cores. **Horticultura Brasileira**, v.23, p.773-779, 2005.

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.

PARRY, M.L.; CANZIANI, O.F.; PALUTIKOF, J.P.; VAN DER LINDEN, P.J.; HANSON C.E. (ed.). **Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.**

Disponível em:  
[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg2/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/contents.html). Acessado em 15 de julho de 2010.



PAYERO, J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L.; ALLEN, R.G. Guidelines for validating Bowen Ratio data. **Transactions of the ASAE**, v.46, p.105-1060, 2003.

PENMAN, H. L.; ANGUS, D. E.; BAVEL, C. H. M. Microclimatic factors affecting evaporation and transpiration. In: HAGAN, R. M.; HAISE, H. R.; EDMINSTER, T. W. (ed.). **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1967.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

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.

PERRY, C. Irrigation reliability and the productivity of water: A proposed methodology using evapotranspiration mapping. **Irrigation and Drainage Systems**, v.19, p.211-221, 2005.

PERRY, C; STEDUTO, P; ALLEN, R. G.; BURT, C. M. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1517-1524, 2009.

RAMOS, J. G.; CRATCHLEY, C.R; KAY, J. A.; CASTERAD, M. A.; MARTÍNEZ-COB, A.; DOMÍNGUEZ, R. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of N.E. Spain. **Agricultural Water Management**, v.96, p.638-652, 2009.

RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, v.13, p.125-153, 2000.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 477p.

RENAULT D.; W. WALLENDER. Nutritional water productivity and diets. **Agricultural Water Management**, v.45, p.275-296, 2000.

RESENDE, G. M.; COSTA, N. D. **Sistema de produção de melão: Socioeconomia**. Versão eletrônica, ago. 2010. Disponível em < <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Melao/SistemaProducaoMelao/index.html> >. Acessado em: 30 de junho de 2010.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation**. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA, 1 – 371, 1974.

SAKAR, S.; BISWAS, M.; GOSWAMI, S. B.; BANDYOPADHYAY, P. K. Yield and water use efficiency of cauliflower under varying irrigation frequencies and water application methods in Lower Gangetic Plain of India. **Agricultural Water Management**, v. 97, p.55-1662, 2010.

SAMPAIO, R. A.; ARAÚJO, W. F. Importância da cobertura plástica do solo sobre o cultivo de hortaliças. **Agropecuária Técnica**, v.22, p.1-12, 2001.

SAVAGE, m. J.; EVERSON, C. S.; METELERKAMP, B. R. Bowen ratio evaporation measurement in a remote montane grassland: Data integrity and fluxes. **Journal of Hydrology**, v.376, p.249-260, 2009.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, p. i-xii, 1996.

SENAR. **Cultivo de melão: manejo, colheita, pós-colheita e comercialização**. Brasília: Serviço Nacional de Aprendizagem Rural, 2007. 104p.

SENAY, G. B.; BUDDLE, M. E.; VERDIN, J. P. Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) approach for estimating landscape ET: Validation with the METRIC model. **Agricultural Water Management**, v.98, p.606-618, 2011.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, p.201-211, 2005.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, p.243-252, 2005.

SILVA, M. C.; MEDEIROS, J. F.; NEGREIROS, M. Z.; SOUZA, V. F. Produtividade de frutos de meloeiro sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação, com ou sem cobertura do solo. **Horticultura Brasileira**, v.23, n.2, p.202-205, 2005.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM – Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.14, p.174-186, 2006.

SILVA, V. P. R ; AZEVEDO, P. V. de ; SILVA, B. B. da . Surface Energy Fluxes and Evapotranspiration of a Mango Orchard Grown in a Semiarid Environment. **Agronomy Journal**, v.99, p.1391-1396, 2007.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado de São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. **Revista Caatinga**, v.24, p.145-152, 2011.

SINGH, R. K.; IRMAK, A.; IRMAK, S.; MARTIN, D. L. Application of SEBAL model for mapping evapotranspiration and estimating surface energy fluxes in South-Central Nebraska. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.3, p.273-285, 2008.

SOARES, J. M.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. Bowen-Ratio Energy Balance associated errors in vineyards under dripping irrigation. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, p.233-240, 2007.

SOUZA, V. F.; COELHO, E. F.; SOUZA, V. A. B. Frequência de irrigação em meloeiro cultivado em solo arenoso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.659-664, 1999.

SOBRINHO, B. R.; GUIMARÃES, J. A.; FREITAS, J. A. D.; ASSIS, J. S.; MESQUITA, A. L.; AZEVEDO, F. R. A Produção Integrada de Melão no Brasil. In: SOBRINHO, R. B.; GUIMARÃES, J. A.; FREITAS, J. A. D.; TERAPO, D. (org.). **Produção integrada do melão**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, Banco do Nordeste do Brasil, 2008.

SUN, Z.; WEI, B.; SU, W.; SHEN, W.; WANG, C.; YOU, D.; LIU, Z. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. **Mathematical and Computer Modelling**, v.54, p.1086-1092, 2011.

TAKAGI, K.; KIMURA, R.; SAYLAN, L. Variability of surface characteristics and energy flux patterns of sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) under well-watered conditions. **Theoretical and Applied Meteorology**, v.96, p.261-273, 2009.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. 355p. Tese de Doutorado. Universidade de Idaho, Moscow, Idaho, Estados Unidos da América., 2003.

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.

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

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W.G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part A: calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p.462-476, 2009.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W.G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part B: Application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p.477-490, 2009.

TODD, R. W; EVETT, S.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.335-348, 2000.

TREZZA, R. **Evapotranspiration using a Satellite-Based Surface Energy Balance with standardized ground control**. Tese de Doutorado. Universidade do estado de Utah, Logan, Utah, Estados Unidos da América, 2002.

UNLAND, H. E.; HOUSER, P. R.; SHUTTLEWORTH, W. J.; YANG, Z-L. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.82, p.119-153, 1996.

WANG, K.; LI, Z.; KRIBB, M. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley–Taylor parameter. **Remote Sensing of Environment**, v.102, p.293-305, 2006.

WANG, Y.; XIE, Z.; MALHI, S. S.; VERA, C. L.; ZHANG, Y.; GUO, Z. Effects of gravel–sand mulch, plastic mulch and ridge and furrow rainfall harvesting system combinations on water use efficiency, soil temperature and watermelon next term yield in a semi-arid Loess Plateau of northwestern China. **Agricultural Water Management**, v.101, p.88-92, 2011.

YOKWE, S. Water productivity in smallholder irrigation schemes in South Africa. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1223-1228, 2009.

ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.1629-1640, 2008.

ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; TONG, L.; DU, T. Variation in vineyard evapotranspiration in an arid region of northwest China. **Agricultural Water Management**, v.97, p.1898-1904, 2010.

ZEGGAF, A. T.; TAKEUCHI, S.; DEGHANISANIJ, H.; ANYOJI, H.; YANO, T. A Bowen ratio technique for partitioning energy fluxes between maize transpiration and soil surface evaporation. **Agronomy Journal**, v.100, p.988-996, 2008.

ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. **Agricultural Water Management**, v.89, p.287-296, 2007.

ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W. G. M.; FRAITURE, C. MOLDEN, D. J. A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat. **Agricultural Water Management**, v.97, p.1617-1627, 2010.