

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**LUIS CLENIO JÁRIO MOREIRA**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA MELANCIA IRRIGADA POR MEIO DO SEBAL,  
BALANÇO HÍDRICO E CORRELAÇÕES TURBULENTAS**

**FORTALEZA – CEARÁ**

**2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**LUIS CLENIO JÁRIO MOREIRA**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA MELANCIA IRRIGADA POR MEIO DO SEBAL,  
BALANÇO HÍDRICO E CORRELAÇÕES TURBULENTAS**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Professor Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.

**LUIS CLENIO JÁRIO MOREIRA**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA MELANCIA IRRIGADA POR MEIO DO SEBAL,  
BALANÇO HÍDRICO E CORRELAÇÕES TURBULENTAS**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semi árido.

Orientador: Professor Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.

Aprovada em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.(Orientador)**  
**Universidade Federal do Ceará - UFC**

---

**Profa. Eunice Maia de Andrade, Ph.D.**  
**Universidade Federal do Ceará – UFC**

---

**Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva,**  
**Universidade Federal de Campina Grande - UFCG**

---

**Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra**  
**Universidade Federal do Ceará - UFC**

M836e Moreira, Luis Clenio Jário  
Evapotranspiração da melancia irrigada por meio do sebal, balanço  
hídrico e correlações turbulentas/ Luis Clenio Jário Moreira, 2009  
92 f. ; il. color. enc.

Orientador: Prof. PhD Adunias dos Santos Teixeira

Área de concentração: Manejo e conservação de bacias hidrográficas no  
semiárido

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de  
Ciências Agrárias. Depto. de Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2009.

1. Balanço energético 2. Sensoriamento remoto 3. Citrullus lanatus  
I. Teixeira, Adunias dos Santos (orienta.) II. Universidade Federal do Ceará  
– Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola III. Título

CDD **630**

DEDICO

**Aos meus pais, Clair e Rizoleta, e familiares em geral.**

## AGRADECIMENTOS

À Deus em primeiro lugar, por ter mim dado o dom da vida, por ter dado força durante o percurso, por ter mim colocado no caminho de pessoas especiais as quais jamais irei esquecer;

Ao Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira, orientador desta dissertação, pela amizade e por todo empenho, sabedoria, compreensão e, acima de tudo, exigência. Gostaria de ratificar a sua competência, participação com discussões, correções, revisões e sugestões;

Ao Prof. Marcus Bezerra, Profª. Eunice e Prof. Bernardo Barbosa pela atenção e ensinamentos;

A meus pais Clair e Rizoleta, irmãos Maicon e Deives, minha querida namorada Juliana e minha cunhada Edna por serem os principais incentivadores em minha carreira estudantil, em fim toda a minha família, pelo amor, apoio, compreensão e que sempre estiveram dispostos a ajudar-me, especialmente meu avô Antônio (*in memória*);

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade oferecida da concretização de um sonho. Ao Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) e aos professores, Claudivan, Moreira, José Carlos, Renildo, Renato, Thales, Omar, Francisco de Souza.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia e aos colegas professores Evando, Pahlevi, Márcia, Ariosvana, Luiz Cesar, Cristina, Erika, Rafaela e Vidal.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de bolsa de estudo durante o Curso;

A Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, em especial a Eduardo Sávio, Fernando e Bosco pelo empréstimo do Eddy Correlation.

Aos amigos do grupo de pesquisa que colaboraram diretamente para realização desse trabalho: Dimas, Lúcio, Rafaela, Mauricélio, Alex, Tadeu, Firmino e Davi.

Aos colegas estudantes de Mestrado, Doutorado e Funcionários do departamento.

Aos amigos Cley Anderson, Alexandre, Tomil, Fabrício, Claudenilton, Hernandes, Cleiton, Dirceu, Fernando, Flávio, Joseílson, Bia, Rodrigo, Rosilene, Gilson, Nildeci, Narcisio, Auriceza, Deodato, Adoveu e Darlan.

Muito obrigado!

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	15
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>	17
2.1 Caracterizações de solo	17
2.1.1 Solo	17
2.1.2 Umidade do solo	17
2.2 Métodos para medir a umidade do solo	18
2.2.1 Gravimétrico	18
2.2.2 Sensores capacitivos	19
2.3 Dinâmica da água no solo	21
2.3.1 Curva Característica da Água no Solo	21
2.3.2 Condutividade Hidráulica do solo ( $\theta$ )	22
2.3.3 Movimento da água no solo	23
2.4 Evapotranspiração	23
2.4.1 Fatores que afetam a evapotranspiração	24
2.4.2 Evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura	25
2.5 Estimativa da evapotranspiração	26
2.5.1 Balanço hídrico no solo	27
2.5.2 Balanço de energia em uma superfície vegetada	27
2.5.3 Correlações turbulentas	28
2.5.4 SEBAL	31
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	33
3.1 Área de Estudo	33
3.2 Descrição da cultura a ser estudada	34
3.3 Irrigação	35
3.4 Cobertura foliar	35
3.5 Evolução da Temperatura °C em diferentes níveis a partir da superfície	37
3.6 Evapotranspiração com Balanço hídrico no solo	37
3.6.1 Determinação da curva de retenção da água no solo	37



3.6.2	Determinação da função $K(\theta)$ – método do perfil instantâneo	39
3.6.3	Calibração dos Sensores capacitivos em Campo e Laboratório	39
3.6.4	Determinação da evapotranspiração pelo balanço hídrico	40
3.7	Balanço de radiação e evapotranspiração usando correlações turbulentas	41
3.8	Balanço de radiação e evapotranspiração usando o algoritmo SEBAL e imagens do TM-LANDSAT 5	43
3.8.1	Saldo de radiação	44
3.8.2	Fluxo de calor no solo	45
3.8.3	Fluxo de calor sensível	46
3.8.4	Fluxo de calor latente e evapotranspiração horária	46
3.8.5	A evapotranspiração diária ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	46
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>48</b>
4.1	Cobertura Foliar	48
4.2	Temperatura do ar	48
4.3	Evapotranspiração com balanço hídrico no solo	51
4.3.1	Determinação da curva de retenção da água no solo	51
4.3.2	Determinação da função $K(\theta)$	52
4.3.3	Calibração do sensor capacitivo	52
4.3.4	Determinação da Evapotranspiração com Balanço hídrico usando o sensor Capacitivo	54
4.4.	Balanço de energia na superfície com eddy correlation	57
4.4.1	Evolução diária da densidade de fluxo de energia	57
4.4.2	Energia diária acumulada durante parte do experimento	59
4.4.3	Partição do saldo de radiação entre os componentes do balanço de energia	61
4.4.4	Fechamento do balanço de energia	62
4.4.5	Evapotranspiração pelo método das correlações turbulentas	63
4.5	SEBAL	67
4.5.1	Elementos constituintes da região estudada	67
4.5.2	Mapas Temáticos da Radiação Líquida ( $R_n$ )	69
4.5.3	Mapas Temáticos do Fluxo de calor no Solo ( $G$ )	71
4.5.4	Mapas Temáticos do Fluxo de calor Sensível ( $H$ )	72
4.5.5	Mapas Temáticos do Fluxo de calor Latente ( $LE$ )	74

4.5.6 Mapas Temáticos da Evapotranspiração Diária ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	76
4.6 Validações do SEBAL	78
4.6.1 Densidades de fluxo de energia	78
4.6.2 Validação do SEBAL – Evapotranspiração	82
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	84
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	85
<b>ANEXOS</b>	93
Anexo 1. Programa feito no Matlab para separação das leituras dos sensores capacitivos	89

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Localização da Área de estudo	33
Figura 02 - (2 <sup>a</sup> ) Estrutura para obtenção da imagem no campo – (2b) imagem obtida – (2c) imagem com área delimitada – (2d) imagem trabalhada em um editor de imagens – (2e) – imagem classificada no ENVI 4.3 a partir da imagem trabalhada no editor	36
Figura 03 – Torre de PVC onde foram instalados os sensores	37
Figura 04 – (4 <sup>a</sup> ) Coleta das amostras em campo e (4b) Aparelho de Richards ou Câmara de Sucção	38
Figura 05 – Parcela experimental em campo para determinação do $K(\theta)$	39
Figura 06 – Estação Micrometeorológica	42
Figura 07 – Desenvolvimento do algoritmo SEBAL	44
Figura 08 – Cobertura foliar da melancia	48
Figura 09 - Variação horária da temperatura do ar nos níveis de 0, 10, 50, 100 e 150 cm de altura na área de melancia para o dia em 17/12/2008	49
Figura 10 - Variação horária da temperatura do ar nos níveis de 0, 10, 50, 100 e 150 cm de altura na área de melancia para o dia em 02/01/2009	50
Figura 11 - Temperaturas medidas nos cinco níveis a partir do solo para os dias 17/12/2008 e 02/01/2009 às 09:45'00", hora da obtenção das imagens do TM-Landsat 5	51
Figura 12 - Curvas características da água nas profundidades 7,5; 22,5; 37,5 e 52,5 cm no solo em que foi plantada a melancia	52
Figura 13 - Umidade volumétrica em função da frequência (13a) campo gravimétrico; (13b) calibração curva; (13c) laboratório gravimétrico	53
Figura 14 – Relação entre as três calibrações do sensor: (14a) Calibração curva x Campo Gravimétrico; (14b) Laboratório Gravimétrico x Campo Gravimétrico; (14c) Laboratório Gravimétrico x Calibração Curva	54
Figura 15 - Umidade do solo monitorada com sensores capacitivos nas profundidades 7,5 e 22,5 cm no dia 17/12/2009	55
Figura 16 - Variação ao longo do dia do saldo de radiação, dos fluxos de calor sensível, calor latente e calor no solo para o dia 351 no ano de 2008	58

Figura 17 - Variação ao longo do dia do saldo de radiação, dos fluxos de calor sensível, calor latente e calor no solo para o dia 356 no ano de 2008	58
Figura 18 - Variação ao longo do dia do saldo de radiação, dos fluxos de calor sensível, calor latente e calor no solo para o dia 361 no ano de 2008	59
Figura 19 - Variação ao longo do dia do saldo de radiação, dos fluxos de calor sensível, calor latente e calor no solo para o dia 02 no ano de 2009	59
Figura 20 - Variação diária da radiação global ( $R_g$ ), do saldo de radiação ( $R_n$ ), do fluxo de calor latente ( $LE$ ), do fluxo de calor sensível ( $H$ ) e do fluxo de calor no solo ( $G$ ), na cultura da melancia, durante o período de 12/12/2008 a 05/01/2009, na área de estudo	60
Figura 21 - Evolução das razões $LE/R_n$ , $H/R_n$ e $G/R_n$ diárias para parte dos dias do período experimental	62
Figura 22 - Fechamento da equação do balanço de energia da superfície para os dias 351, 356, 361 e 2 entre Dezembro de 2008 e Janeiro de 2009	63
Figura 23 - Evolução ao longo do dia da $E_{To}$ (metodologia da FAO-56) e $E_{Tc}$ (correlações turbulentas) para o dia 351 no ano de 2008	64
Figura 24 - Evolução ao longo do dia da $E_{To}$ (metodologia da FAO-56) e $E_{Tc}$ (correlações turbulentas) para o dia 356 no ano de 2008	65
Figura 25 - Evolução ao longo do dia da $E_{To}$ (metodologia da FAO-56) e $E_{Tc}$ (correlações turbulentas) para o dia 361 no ano de 2008	65
Figura 26 - Evolução ao longo do dia da $E_{To}$ (metodologia da FAO-56) e $E_{Tc}$ (método das correlações turbulentas) para o dia 02 no ano de 2009	66
Figura 27 - Evolução diária da $E_{To}$ (metodologia da FAO-56) e $E_{Tc}$ (método das correlações turbulentas) durante 25 dias na melancia, de 12/12/2008 a 05/01/2009	67
Figura 28 – Região do Baixo Acaraú em composição RGB no dia 17/12/2008	68
Figura 29 – Região do Baixo Acaraú em composição RGB no dia 02/01/2009	69
Figura 30 - Imagem Temática de Radiação Líquida ( $W\ m^{-2}$ ) no dia 17/12/2008 no Baixo Acaraú	70
Figura 31 - Imagem Temática de Radiação Líquida ( $W\ m^{-2}$ ) no dia 02/01/2009 no Baixo Acaraú	70

Figura 32 - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Solo ( $W m^{-2}$ ) no dia 17/12/2008 no Baixo Acaraú	72
Figura 33 - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Solo ( $W m^{-2}$ ) no dia 02/01/2009 no Baixo Acaraú	72
Figura 34 - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Sensível ( $W m^{-2}$ ) no dia 17/12/2008 no Baixo Acaraú	74
Figura 35 - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Sensível ( $W m^{-2}$ ) no dia 02/01/2009 no Baixo Acaraú	74
Figura 36 - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Latente ( $W m^{-2}$ ) no dia 17/12/2008 no Baixo Acaraú	75
Figura 37 - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Latente ( $W m^{-2}$ ) no dia 02/01/2009 no Baixo Acaraú	76
Figura 38 - Mapa Temático de ET24h no dia 17/12/2008 no Baixo Acaraú	77
Figura 39 - Mapa Temático de ET24h no dia 02/01/2008 no Baixo Acaraú	78
Figura 40 - Fluxos instantâneos medidos em campo e obtidos pelo SEBAL com e sem correções em 17/12/2008	79
Figura 41 - Fluxos instantâneos medidos em campo e obtidos pelo SEBAL com e sem correções em 02/01/2009	80
Figura 42 – Análise comparativa entre os métodos de estimativa de evapotranspiração no dia 17/12/2008	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria (areia, silte e argila), classe textural e densidades dos horizontes pedológicos	34
Tabela 02 – Valores dos parâmetros $\alpha$ , m, n, $\theta_r$ , $\theta_s$ da equação de van Genuchten	51
Tabela 03 – Balanço Hídrico no solo em intervalos de irrigações nos dias 17, 18 e 19/12/2009	56

## RESUMO

### EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA MELANCIA IRRIGADA POR MEIO DO SEBAL, BALANÇO HÍDRICO E CORRELAÇÕES TURBULENTAS

Luis Clenio Jário Moreira

Nas aplicações feitas com o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), estão sendo utilizadas parametrizações de processos físicos ajustados para outras regiões do planeta. Portanto, existe uma necessidade de validação das estimativas feitas com o algoritmo comparando com outros métodos usuais de estimativa de evapotranspiração. Assim, esse trabalho teve como objetivo avaliar o algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração da melancia irrigada usando como métodos comparativos o balanço hídrico no solo e método das correlações turbulentas (*eddy correlation*). A área estudada foi um lote de 1 ha localizado no Perímetro Irrigado Baixo Acaraú. A cobertura Foliar foi obtida a partir de fotografias digitais. Foram instalados sensores a partir da superfície do solo até a altura de 1,5 m para monitoramento da temperatura no ar. Para fazer o balanço hídrico no solo foi encontrada a função da condutividade hidráulica não saturada através da metodologia do perfil instantâneo. O balanço hídrico no solo foi feito nos dias 17, 18 e 19/12/2008 na camada de 0 a 30 cm usando sensores capacitivos de umidade. Para avaliar os componentes do balanço de radiação e a evapotranspiração através do método das correlações turbulentas foi instalada uma torre micrometeorológica no centro da área, onde o fluxo de calor latente (LE), o fluxo de calor sensível (H) e a evapotranspiração foram determinados. Com dados climáticos de uma estação meteorologia próximo a área e usando a metodologia da FAO foi estimado a radiação líquida (Rn) e o fluxo de calor no solo (G). O algoritmo SEBAL foi usado nas imagens do TM-Landsat 5 dos dias 17/12/2008 e 02/01/2009 para estimar o balanço de radiação e a evapotranspiração diária. A temperatura na superfície e a 10 cm de altura próximos ao meio dia foi superior a 40°C. A função da condutividade hidráulica no solo não saturado para camada de 0 – 15 e 15 – 30 cm foi:  $K(\theta) = 0,089e^{28,53\theta}$  e  $K(\theta) = 0,0469e^{48,773\theta}$ , respectivamente. A evapotranspiração obtida através do balanço hídrico com sensores capacitivos nos dias analisados foi 9,37; 12,18 e 11,27 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente em 17; 18 e 19 de dezembro de 2008. No balanço de energia observou-se que o fluxo de calor latente foi subestimado usando o método das correlações turbulentas apresentando valores máximos no dia nunca superiores a 150 W m<sup>-2</sup>. O fluxo de calor sensível esteve sempre maior que o LE durante o dia, apresentando valores máximos próximos a 300 W m<sup>-2</sup>. O erro de fechamento da equação do balanço de energia obtido através do equacionamento entre H + LE e Rn – G foi de cerca de 60%. Os valores médios diários da ETc (correlações turbulentas) para parte do período experimental estiveram na faixa de 0,91 a 1,18 mm dia<sup>-1</sup>, com média de 0,96 mm dia<sup>-1</sup>. As imagens de satélites em que foi usado o algoritmo SEBAL apresentaram nuvens comprometendo a estimativa dos componentes do balanço de radiação e a evapotranspiração. Na área da melancia, a evapotranspiração diária usando o SEBAL nos dias 17/12/2008 e 02/01/2009 foi 6,5 e 4,0 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Na análise comparativa, a ETo na hora da passagem do satélite foi de 0,53 mm h<sup>-1</sup>, enquanto a ETc foi de 0,78; 0,11 e 0,55 mm h<sup>-1</sup> estimada com o SEBAL, métodos das correlações turbulentas e balanço hídrico, respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Balanço de energia, Sensoriamento remoto, *Citrullus lanatus*.

## ABSTRACT

### ESTIMATING IRRIGATED WATERMELON EVAPOTRANSPIRATION USING SEBAL, SOIL-WATER BALANCE AND EDDY CORRELATIONS

Luis Clenio Jário Moreira

In applications of the SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) algorithm parameters for physical processes adjusted for other regions of the planet are commonly used. Therefore, there is a need for validation of the estimates made with the algorithm compared with other conventional methods of estimating evapotranspiration. Thus, this study main goal was to evaluate the satellite-based algorithm to estimate evapotranspiration of irrigated watermelon using as comparative methods: soil water balance and eddy correlation. The studied area was a plot of 1 ha located in the irrigated district of the low Acaraú River. Foliar coverage was obtained from digital images taken from a camera. Sensors were installed from the soil surface to a height of 1.5 m for monitoring the temperature in the air. The unsaturated hydraulic conductivity function of the soil was obtained using the instantaneous profile method. The water balance in the soil was done on days 17, 18 and 19 December, 2008, in the 0 to 30 cm depth using soil moisture capacitive sensors. To evaluate the components of net radiation and evapotranspiration using the method of eddy correlation, a micrometeorological tower was installed in the center of the studied area, where latent heat flux (LE), sensible heat flux (H) and evapotranspiration were determined. With climate data from a meteorological station nearby and using the FAO's methodology, net radiation (Rn) and soil heat flow (G) were determined. The SEBAL algorithm was applied in two Landsat5 satellite images acquired in 17/12/2008 and 02/01/2009 for estimating the net radiation and daily evapotranspiration. The measured temperature at the soil surface and in the air at 10 cm high was over 40 ° C near noon time. The unsaturated hydraulic conductivity function found was of the form  $K(\theta) = 0.089 e^{28.53\theta}$  and  $K(\theta) = 0.0469 e^{48.773\theta}$ , respectively for 0 - 15 and 15 - 30 cm. The evapotranspiration obtained from soil water balance with capacitive sensors in the study period was 9.37; 12.18 and 11.27 mm day<sup>-1</sup>, respectively in 17; 18 and December 19, 2008. For the radiation balance it was found that the latent heat flux was underestimated by using the method of eddy correlation with maximum values of the order of 150 W m<sup>-2</sup>. The sensible heat flux was always larger than the LE during the day, with maximum values near 300 W m<sup>-2</sup>. The energy balance done but accounting H + LE and Rn - G produced a residual error of around 60%. The daily average values of ETc (eddy correlations) for part of the experimental period were in the range of 0.91 to 1.18 mm day<sup>-1</sup>, with an average of 0.96 mm day<sup>-1</sup>. The satellite image that was applied to SEBAL algorithm presented many clouds, affecting the estimation of the components of radiation balance and evapotranspiration. In the area of watermelon, SEBAL estimates of evapotranspiration for dates 17/12/2008 and 02/01/2009 were 6.5 and 4.0 mm day<sup>-1</sup>, respectively. For validation, the ET<sub>o</sub> obtained by Penman-Montheith method at the time of satellite overpass was 0.53 mm h<sup>-1</sup>, while Etc obtained with SEBAL, eddy correlation and soil-water balance was 0.78; 0.11 and 0.55 mm h<sup>-1</sup>, respectively.

**KEYWORDS:** Energy balance, Remote sensing, *Citrullus lanatus*.



## 1. INTRODUÇÃO

Em atividades em que a água é o recurso natural determinante, como em agricultura irrigada e gestão de recursos hídricos, por exemplo, a estimativa da evapotranspiração é de fundamental importância. De acordo com Medina et al. (1998), a estimativa da evapotranspiração é essencial em planejamento de irrigação, na avaliação de perdas de água de reservatórios, nas previsões de escoamento superficial e em estudos de meteorologia e climatologia. A nível mundial, foram realizadas inúmeras avaliações de métodos para estimativa da evapotranspiração máxima (ET<sub>m</sub>) de culturas.

A quantificação das perdas de água de superfícies cultivadas para a atmosfera é muito valiosa no planejamento de atividades agrícolas e no gerenciamento dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica. Para que se possa determinar essas perdas, tão importantes no ciclo hidrológico em escala regional, foram desenvolvidos algoritmos que possibilitam a estimativa da evapotranspiração utilizando técnicas de sensoriamento remoto e imagens de satélite como, por exemplo, as do TM-Landsat 5 e outros (SILVA & BEZERRA, 2006).

Um desses algoritmos é o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), que foi desenvolvido em 1995 por Bastiaanssen (BASTIAANSEN et al., 1998; BASTIAANSEN, 2000), posteriormente melhorado por Allen (ALLEN et al., 2002) e validado em vários ecossistemas mundiais, como Egito, Espanha, Portugal, França, Itália, Argentina, China, Índia, Paquistão, Nigéria, Zâmbia, Etiópia, Estados Unidos, Novo México e no Brasil (TASUMI, 2003; ATAIDE, 2006).

Por exigir poucos dados, o SEBAL é um dos mais destacados algoritmos para estudos dos fluxos de calor e massa na superfície, o que o faz o mais utilizado em países em desenvolvimento. As imagens de satélite possibilitam a determinação do albedo, índices de vegetação e temperatura da superfície, e têm sido utilizadas em diversas regiões do mundo (AHMAD e BASTIAANSEN, 2003; PAIVA, 2005; TASUMI et al., 2003; FOLHES, 2007; BEZERRA et al., 2008).

Uma metodologia bastante utilizada para obter a ET<sub>c</sub> é a medição direta do fluxo de massa de água, para a qual utilizam-se sensores com excelente grau de segurança e confiabilidade (PAÇO, 2003). Um desses métodos de medição é a técnica das correlações turbulentas, abordada nesse trabalho.

O balanço hídrico no solo constitui-se em outro método muito usado para determinar evapotranspiração da cultura. O movimento cíclico da água na lavoura começa com sua penetração no solo por meio da infiltração, continua com seu armazenamento temporário na

zona do sistema radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes (HILLEL, 1971). O que é feito através do balanço hídrico nada mais é do que se tentar quantificar essas entradas e saídas de água no sistema solo-planta.

Nas aplicações feitas com o SEBAL, estão sendo utilizadas parametrizações de processos físicos ajustadas para outras regiões do planeta e, portanto, não são adequadas para nossa realidade, mais notadamente para o semi-árido brasileiro que tem a flora e as condições climáticas bastante diferentes das demais regiões do país. Outra questão de maior relevância é a necessidade de realização de estudos envolvendo a validação das estimativas feitas com o SEBAL e imagens de satélite comparando-os com outros métodos usuais de estimativa de evapotranspiração (TEIXEIRA et al., 2009).

Portanto, objetivou-se com esse trabalho fazer uma avaliação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração na melancia irrigada usando como métodos comparativos o Balanço hídrico no solo e o método das correlações turbulentas. Tendo com objetivos específicos:

1. Fazer o balanço de energia e estimar a evapotranspiração na cultura da melancia com o método das correlações turbulentas – sensor ultrasônico;
2. Obter a evapotranspiração real na cultura da melancia através do balanço hídrico no solo usando o sensor capacitivo de umidade;
3. Estimar o balanço de energia e a evapotranspiração na melancia usando o algoritmo SEBAL e imagens do satélite TM-LANDSAT 5;
4. Fazer uma análise comparativa entre os métodos.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Caracterizações do solo**

#### **2.1.1 Solo**

O solo constitui um sistema polifásico, heterogêneo, particulado, disperso e poroso, no qual a unidade interfacial por unidade de volume pode ser muito grande. Tal sistema polifásico é dividido em três fases: a fase sólida ou a matriz do solo; a fase líquida ou água do solo, podendo ser denominada mais propriamente como solução do solo e a fase gasosa que consiste na atmosfera do solo. A matriz sólida do solo inclui partículas que variam na composição mineralógica, no tamanho, orientação, sendo composta de substâncias amorfas, particularmente de matéria orgânica atrelada a grãos minerais que, em geral, une-os formando agregados. As características geométricas dos espaços porosos, onde sucede a transmissão e/ou retenção da água e do ar, são ditadas pela organização dos componentes sólidos (HILLEL, 1980).

Segundo Dufranc et al. (2004), o estado de agregação do solo é de grande importância para as atividades agrícolas uma vez que está relacionado com a aeração do solo, desenvolvimento radicular, suprimento de nutrientes, resistência mecânica do solo à penetração, retenção e armazenamento de água.

Basicamente, existem dois processos que explicam a retenção e armazenamento de água pelos solos. No primeiro a retenção ocorre nos microporos dos agregados e pode ser ilustrada pelo fenômeno da capilaridade, porém não se pode afirmar que o solo é um simples tubo capilar e sim, uma composição irregular de poros e canais formados pelos sólidos. No segundo processo, a retenção ocorre nas superfícies dos sólidos do solo devido à adsorção. De acordo com Libardi (1999), é sempre possível expressar a afinidade do solo pela água como equivalente a uma altura de ascensão da água no tubo capilar.

#### **2.1.2 Umidade do solo**

Segundo Libardi (1999), a umidade do solo é o índice quantificador mais básico da água numa dada amostra de solo e, tradicionalmente, tem sido expressa:

- a) à base de massa;
- b) à base de volume.

A umidade à base de massa ( $u$ ) é representada pela relação entre a massa ocupada pela água em uma amostra de solo e a massa de solo seco nesta amostra. A relação entre umidade à base de massa e umidade à base de volume ( $\theta$ ) é dada pela densidade global do solo. A umidade do solo, ou umidade relativa do solo, pode ser expressa como: relativa à massa de sólidos, relativa à massa total, relativa ao volume de sólidos, relativa ao volume total e relativa ao volume dos poros. A equação 1 representa a relação entre o volume de água do solo e o volume total do solo (KLAR, 1988).

$$\theta = V_{\text{água}}/V_{\text{total}} \quad (1)$$

Sendo,  $\theta$  = umidade volumétrica ou volume molhado ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ),  $V_{\text{água}}$  = volume de água contido em uma amostra de solo ( $\text{m}^3$ ) e  $V_{\text{total}}$  = volume total da amostra de solo ( $\text{m}^3$ ).

A conveniência do uso de  $\theta$  ao invés da massa de água para expressar a umidade do solo é sempre maior, devido ao fato de ser mais diretamente adaptável à computação dos fluxos e às quantidades de água adicionadas ao solo por irrigação ou precipitação e às quantidades subtraídas do solo por drenagem ou evapotranspiração. Além disso,  $\theta$  representa a razão de profundidade de água do solo, ou seja, a profundidade de água por unidade de profundidade de solo (HILLEL, 1980).

## 2.2 Métodos para medir a umidade do solo

São diversos os métodos utilizados na determinação da umidade do solo, no entanto, nenhum deve ser considerado como o melhor deles. Segundo Miranda et al. (2001), a escolha irá depender de suas limitações que podem ser a baixa precisão, alta complexidade, ou a exigência de equipamentos que não estejam disponíveis.

Estes autores classificam os métodos em diretos e indiretos. Os diretos permitem a determinação direta da umidade do solo, sendo o principal o método padrão da estufa (Gravimétrico). Já os indiretos baseiam-se em propriedades químicas ou físicas do solo, que são função do conteúdo de água, tais como a moderação de nêutrons, a resistência a passagem de uma corrente elétrica, a constante dielétrica e a tensão da água no solo. Todos os métodos indiretos necessitam de calibração (LEÃO et al., 2007).

### 2.2.1. Gravimétrico

A técnica forno-secante utilizada no método gravimétrico é a mais amplamente empregada para medir a umidade do solo, constituindo-se no padrão para a calibração de

todas as outras técnicas. Neste método, remove-se uma amostra de solo no campo e determina-se o conteúdo da massa de água em relação à massa de terra seca.

Mesmo assegurando medidas precisas, esta técnica também possui várias desvantagens como a necessidade de equipamentos de laboratório e ferramentas para amostragem, lentidão - são requeridas 24 horas de secagem; além de ser um método destrutivo devido ao fato de requerer a remoção de amostras do solo. Assim, torna-se impossível medir a umidade do solo exatamente no mesmo ponto posteriormente, e as medidas não serão condizentes com as medidas *in loco* considerando toda a área devido à variabilidade espacial do solo (FEDRO et al., 1994).

### 2.2.2. Sensores capacitivos

O sensor capacitivo tem comportamento eletrostático similar ao de um capacitor de placas planas: um campo elétrico é formado entre as suas placas, ocorrendo uma perturbação quando qualquer material entra nesse campo, o que causa uma variação na oscilação que se mantém enquanto esse material permanecer dentro do campo. O material que preenche o espaço entre as placas de um capacitor é chamado de dielétrico e possui um valor específico que varia de acordo com a sua composição.

A constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ) de um material é uma propriedade fundamental que independe da geometria do condutor e pode ser definida quando este material preenche todo o espaço entre as placas do capacitor (RESNICK et al., 1992).

Tommaselli (1997 apud Trintinalha et al., 2001) apresenta a constante dielétrica dos componentes do solo como sendo: ar dos poros ( $\epsilon_r = 1 \text{ Fm}^{-1}$ ); partículas sólidas ( $\epsilon_r = 3 \text{ a } 5 \text{ Fm}^{-1}$ ) e água ( $\epsilon_r = 80 \text{ F m}^{-1}$ ).

Dentre os métodos utilizados com a caracterização da constante dielétrica, as técnicas mais comuns são os sensores capacitivos e os reflectômetros no domínio do tempo (TDR) que medem a permissividade do solo.

Como a constante dielétrica é uma propriedade do material isolante utilizado em capacitores, a sua ação influirá na capacitância total do dispositivo e, a partir do seu efeito, pode-se então determinar a umidade ao medir a capacitância entre dois eletrodos implantados dentro do solo. Considera-se também, que quanto maior o valor de  $\epsilon_r$  mais fácil o material será detectado (SIEMENS, 2003).

Os sensores capacitivos têm por base o uso de um capacitor e um frequencímetro em um circuito RC, onde a frequência de oscilação do circuito depende do teor de água no solo

no qual o mesmo está inserido. Considerando um capacitor de placas paralelas e planas, obtém-se a capacitância pela Equação 2.

$$C = \xi * \frac{ab}{d} \quad (2)$$

Sendo  $ab$  a área das placas;  $d$  a distância que as separa e  $\xi$  a permissividade do meio. A capacitância é medida em Farads ( $C V^{-1}$  ou  $C2 (N m)^{-1}$ ). A unidade de capacitância é o Farad (F); pois a permissividade é medida em  $F m^{-1}$  (DURNEY, 1985; HICKEY, 1961).

Nadler & Lapid (1996) afirmam que existe a necessidade da disponibilização de dispositivos para medir a umidade do solo com acurácia, a preços acessíveis e estrategicamente convenientes, que substituam o uso da sonda de nêutrons. Além disso, características como equipamentos mais leves, instalação permanente, rápida resposta, ausência de efeitos radioativos e pouco erro aleatório de contagem associado, tornam os sensores capacitivos bem mais vantajosos que os nucleares tradicionais.

Silva (2005) desenvolveu um sensor usando uma sonda capacitiva capaz de monitorar a umidade do solo que se tornou uma ferramenta confiável e pouco exposta a influências exteriores, obteve ainda a curva de calibração da sonda e verificou a influência da temperatura. Cruz (2007) avaliou esse sensor capacitivo em condições de laboratório, através da avaliação do tempo de resposta, do efeito da temperatura e sensibilidade concluindo que o sensor apresenta resposta à variação de umidade do solo com comportamento linear permitindo, assim, a sua utilização no monitoramento da irrigação. Oliveira (2008) avaliou o seu uso no manejo da irrigação além de validar em campo a equação de calibração para umidade, analisando também a influência das distâncias de instalação dos sensores em relação aos emissores do sistema de irrigação e quantificando o número ideal de sensores por hectare, concluindo que o sensor permite medir a umidade em tempo real e acompanhar a mesma de forma contínua, possibilitando desta forma, o perfeito fracionamento da irrigação. Verificou também que a distância entre o sensor e o emissor tem influência direta na resposta do mesmo.

## 2.3. Dinâmica da água no solo

### 2.3.1. Curva Característica da Água no Solo

Uma forma de avaliar as variações de sucção matricial de um solo é por meio da curva característica de sucção, que representa uma relação gráfica entre a sucção matricial ou total e o teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou grau de saturação do solo (PRESA, 1982). Essa curva permite obter a capacidade de retenção de água no solo.

A sucção normalmente é dividida em dois componentes: o componente matricial (dependente da estrutura e da composição do solo); definido como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água nos vazios, que tende a desaparecer com a saturação, e o componente osmótico (dependente da concentração química da água do solo). A sucção total é soma da sucção matricial e da sucção osmótica (MIGUEL et al., 2006).

A determinação das curvas características de sucção é feita em laboratório seguindo trajetórias de secagem quando uma amostra previamente saturada é exposta a potenciais matriciais gradualmente maiores; com sucessivas medidas desses valores em função do teor de umidade de equilíbrio de cada estágio; ou de umedecimento, quando uma amostra seca ao ar tem seu potencial matricial reduzido gradualmente, também com sucessivas medidas do potencial em função do teor de umidade de equilíbrio em cada estágio (HILLEL, 1971).

Segundo Hillel (1971), quando uma amostra de solo fica exposta a sucções crescentes, inicia-se o fluxo da água para fora da amostra a partir de um determinado valor de sucção matricial. Esse fato se dá quando o maior poro se esvazia e o valor de sucção matricial, nesse momento, é denominado de valor de entrada de ar ou sucção matricial crítica.

Existem vários modelos matemáticos no ajuste da curva de retenção. Um dos mais utilizados é o modelo descrito pela equação abaixo, conhecido como modelo de VAN GENUCHTEN (1980) (LIBARDI, 2004), que relaciona a umidade à base de volume ( $\theta$ ) ao valor absoluto do potencial matricial ( $\psi_m$ ):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha \psi_m|^n\right]^m} \quad (3)$$

Sendo:  $\theta$  é a umidade a base de volume;  $\theta_r$  é a umidade residual;  $\theta_s$  é a umidade de saturação;  $\psi_m$  potencial mátrico e  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  são parâmetros empíricos estimados por regressão.

### 2.3.2. Condutividade Hidráulica do solo $K(\theta)$

Além do potencial total da água  $\psi$ , outra característica do solo, denominada condutividade hidráulica, afeta o movimento da água. A condutividade hidráulica é um parâmetro que mede a facilidade com a qual o solo transmite água. Portanto, quanto maior a condutividade hidráulica, maior a facilidade com que a água se move em um solo (REICHARDT, 1985).

Para um dado solo, a condutividade é tanto maior quanto maior sua umidade  $\theta$ . O valor máximo da condutividade ocorre quando o solo se encontra saturado ( $\theta = \theta_s$ ), e é denominada condutividade hidráulica saturada  $K_0$ . Quando o solo se encontra em secamento, isto é, com o decréscimo de  $\theta$ , a condutividade hidráulica diminui drasticamente até que seu valor chegue a praticamente zero em um solo seco. Nesse caso a condutividade é função da umidade do solo, sendo denominada de condutividade hidráulica do solo não saturado  $K(\theta)$ .

Existem diversos métodos para determinar a condutividade hidráulica em solos não saturados, e estão subdivididos em métodos de campo (perfil instantâneo, camadas impermeáveis), de laboratório (drenagem interna, permeâmetros de carga constante e variável, ar quente) e empíricos (baseados na distribuição do tamanho dos poros) (PREVEDELLO, 1996).

De acordo com Carvalho et al. (2007), o perfil instantâneo é o método mais exato por quantificar diretamente cada componente da equação de Richards. Esse é um método de campo que foi inicialmente desenvolvido por WATSON (1966), aperfeiçoado por HILLEL et al. (1972) e simplificado por LIBARDI et al. (1980). Dentre as suas vantagens, pode-se citar a obtenção de medidas diretas no campo ou local de estudo, apresentando uma maior precisão dos valores de condutividade hidráulica, quando comparados aos de laboratório. Como desvantagens podem-se destacar o consumo elevado de tempo e mão-de-obra, tornando-se um dos grandes problemas para solos que apresentam camadas adensadas ou compactadas, onde o processo de drenagem é muito lento (JONG VAN LIER & LIBARDI, 1999).

O método do perfil instantâneo procura uma solução para a equação de Richards (equação 4), na direção vertical, durante o processo de redistribuição da água,—após a saturação de um perfil de solo e a prevenção do fluxo de água através de sua superfície.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial \psi_t}{\partial z} \right] \quad (4)$$



Em que,  $\theta$  - umidade volumétrica do solo,  $t$  - tempo de redistribuição,  $z$  - coordenada vertical de posição,  $\psi$  - potencial total da água no solo,  $\theta_i$  - umidade no solo,  $K(\theta)$  função condutividade hidráulica  $K$  em função da umidade  $\theta$ .

Montenegro (2002) usou o método do perfil instantâneo em um solo arenoso e encontrou  $K(\theta) = 0,0013e^{77,668\theta}$  na camada de 0 à 60 cm de profundidade com o objetivo de estimar evapotranspiração em mamoeiro próximo ao litoral do Ceará.

### 2.3.3. Movimento da água no solo

Toda vez que no sistema em consideração houver diferenças de potencial total, pode haver movimento de água.

O fluxo da água em solo não saturado, na região do sistema radicular dos cultivos, é muito pouco estudado. No entanto, o seu conhecimento é de fundamental importância no entendimento dos processos de infiltração, redistribuição e suprimento de água às culturas (KLEIN & LIBARDI, 2002).

As propriedades físicas do solo, como a textura e a estrutura, determinam o fluxo de água no solo. Nesse sentido, Ellies et al. (1997) destacam a importância da funcionalidade do sistema poroso do solo, englobando propriedades como: quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. Todas estas propriedades do espaço poroso, que influenciam a condutividade, podem ser reunidas no termo único: “geometria porosa dos solos” (LIBARDI, 1999).

Para determinar a densidade do fluxo de água no solo utiliza-se a equação de Darcy – Buckingham que leva em consideração a condutividade hidráulica não saturada do solo e o gradiente de potencial:

$$q = -K(\theta) \frac{\Delta\psi}{\Delta Z} \quad (5)$$

Sendo  $q$  a densidade de fluxo de água em ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $\Delta\psi$  a variação do potencial total entre dois pontos referenciais (kPa), e  $\Delta Z$  a distância entre esses dois pontos (m).

## 2.4 Evapotranspiração

Vaporização é o processo em que uma substância passa do estado líquido para o estado gasoso. No caso, a substância é a água presente na superfície da Terra. Já a transpiração é o processo em que a água que passa pelo interior da planta se transforma em

vapor e é transferida para a camada de ar próxima à superfície da mesma através de seus estômatos (PEREIRA et al., 2002). A evapotranspiração é a combinação desses dois processos, definindo a perda total de água do sistema solo-planta para a atmosfera em um campo vegetado.

A evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, sendo desta forma um fenômeno de fundamental importância para a vida no planeta. A mesma é responsável por quase todo o volume de água transferido dos continentes para a atmosfera além de desempenhar um papel de suma importância na liberação de calor latente (LE), que de acordo com Bastiaanssen et al. (1998), tem na integração de seu valor no tempo grande importância para diferentes aplicações em estudos de hidrologia, agronomia e modelagem atmosférica.

Calor latente é a quantidade de calor necessária para se variar o estado físico da matéria sem variar a sua temperatura. Já calor sensível é a quantidade de calor necessária para variar a temperatura de um corpo sem que haja variação no estado físico da matéria (RESNICK, 1992).

#### **2.4.1 Fatores que afetam a evapotranspiração**

A evapotranspiração é fortemente influenciada pela vegetação, manejo do solo, gestão das condições ambientais e principalmente por parâmetros condizentes ao clima (ALLEN et al., 1998).

Os elementos do tempo que têm impacto principal neste processo são: radiação solar, temperatura da superfície, temperatura e umidade relativa do ar e o vento (PEREIRA et al., 2002). Já na planta os fatores determinantes são: área foliar, estágio de desenvolvimento, arquitetura foliar, resistência do dossel e outros, geralmente associados ao coeficiente da cultura ( $K_c$ ).

A quantidade de água no solo é muito importante no processo de evapotranspiração. Considerando-se, por exemplo, uma cultura com água disponível, a perda d'água para a atmosfera ocorre sob condições potenciais, dependendo fortemente da energia disponível, já que há uma maior facilidade para a transferência de vapor.

Havendo água disponível no solo, o aumento da temperatura da superfície evaporante aumentará o fluxo de vapor d'água. Além disso, quando a temperatura do ar se eleva, há um aumento na sua capacidade de reter vapor d'água e um conseqüente aumento do déficit de pressão do vapor d'água.

A influência da umidade do ar no fluxo de vapor d'água para a atmosfera refere-se ao fato desse ser proporcional ao déficit de pressão de vapor ( $e_s - e_a$ ) que está associado à quantidade de vapor de água presente na atmosfera. Quanto maior o déficit de pressão de vapor, maior a contribuição desse elemento para o processo evapotranspirativo.

Quando o ar acima de uma superfície evaporante torna-se saturado, o processo de evaporação cessa, ainda que haja energia disponível. Se houver movimentação do ar, o fluxo de vapor d'água aumenta, já que a atuação do vento é no sentido de deslocar a massa de ar úmido da superfície evaporante, dando lugar ao ar mais seco (COSTA, 2007).

#### 2.4.2 Evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura

De acordo com Allen et al. (1998), evapotranspiração de referência é definida como a evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da superfície da cultura ao transporte de vapor d'água igual a  $70 \text{ s.m}^{-1}$ , correspondendo à evapotranspiração de uma superfície gramada, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem restrição hídrica.

O conceito de evapotranspiração de referência foi introduzido para o estudo da demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo, da fase de desenvolvimento ou do manejo da cultura. Ao se tratar de uma cultura com água disponível em abundância, fatores relacionados ao solo não afetam a ETo. Desta forma, os únicos fatores que afetam a evapotranspiração de referência são os elementos atmosféricos. Daí o porquê de a ETo, uma variável atmosférica dependente da escala temporal de interesse, poder ser computada a partir de dados climáticos (BEZERRA, 2006).

A ETo pode ser determinada por equações desde as mais simples, como as baseadas em temperatura, até as mais complexas, que avaliam o balanço de energia ao nível de planta, como o método de Penman-Monteith, citada por ALLEN et al. (1998).

$$ETo = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34\mu_2)} \quad (6)$$

Onde: ETo é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ),  $R_n$  é o saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $T$  é a temperatura média diária a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\mu_2$  é a velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor (kPa),  $e_a$  é a pressão atual de vapor (kPa),  $\gamma$  é a constante psicrométrica, e  $\Delta$  é o gradiente da curva de pressão vapor vs temperatura ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}$ ).

A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e o Órgão das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), consideram o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) como o padrão de estimativa de evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos, sendo utilizado também para avaliar outros métodos de estimativa de  $ET_o$ .

A evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) é definida com sendo a quantidade de água utilizada por uma cultura qualquer em uma de suas fases de desenvolvimento. A evapotranspiração de uma cultura dependerá principalmente dos fatores climáticos, da espécie, do estágio de desenvolvimento da planta e do manejo. Para se determinar as lâminas de água para fins de manejo de irrigação, a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) pode ser calculada utilizando-se a seguinte relação:

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (7)$$

Onde:  $ET_c$  é a evapotranspiração da cultura ( $\text{mm dia}^{-1}$ ),  $K_c$  é o coeficiente da cultura, e  $ET_o$  é a evapotranspiração de referencia ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

Allen et al. (1998) subdividem a evapotranspiração de cultura para duas situações distintas: a evapotranspiração de cultura sob condições padrão e evapotranspiração de cultura sob condições não-padrão. A evapotranspiração de culturas em condições padrão é aquela em que as culturas estão livres de pragas e doenças, bem fertilizadas, crescidas em vastos campos, com solos com quantidade de água satisfatória, obtendo produções abundantes sob dadas condições climáticas. Ainda de acordo com Allen et al. (1998), a evapotranspiração de culturas em condições não-padrão é a evapotranspiração de culturas crescidas em condições ambientais que diferem das condições padrão, como, por exemplo, cultura atacada por pragas e doenças, solos com salinidade elevada, baixa fertilidade do solo e condições de estresse hídrico que pode resultar numa baixa densidade da planta e reduzir a evapotranspiração.

## 2.5 Estimativa da evapotranspiração

Existem diversos métodos destinados à estimativa da evapotranspiração, os quais são classificados em diretos e indiretos. Dentre os métodos diretos pode-se mencionar o método do balanço hídrico no solo, o método que se utiliza de lisímetros de pesagem e/ou de drenagem e o método do tanque classe A. Já dentre os métodos indiretos podem ser citados o método de Penman-Monteith, o método do balanço de energia, o método das correlações turbulentas e métodos que utilizam dados radiométricos do sensoriamento remoto.

### 2.5.1 Balanço hídrico no solo

O conhecimento de como as plantas utilizam a água no solo e de como respondem aos níveis de armazenagem a partir do balanço hídrico, pode ser uma saída viável para o estabelecimento de estratégias eficazes de manejo visando ao melhor uso possível das reservas de água no solo pelas culturas. O movimento cíclico da água na lavoura começa com a sua penetração no solo por meio da infiltração, continua com seu armazenamento temporário na zona do sistema radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes (HILLEL, 1980).

O que é feito através do balanço hídrico nada mais é do que se tentar quantificar essas entradas e saídas de água no sistema solo-planta como mostra a equação:

$$\Delta ARM = I + P \pm ES - q \downarrow + q \uparrow \pm \Delta ESS - ETc \quad (8)$$

em que  $I$  é a irrigação,  $P$  é a precipitação,  $ES$  é escoamento superficial,  $q \downarrow$  é a percolação profunda que eventualmente reabastece o lençol freático,  $q \uparrow$  é ascensão capilar das partes mais rasas do lençol freático para a zona de raízes,  $\Delta ESS$  é a variação da água que flui horizontalmente através do escoamento sub-superficial,  $ETc$  é evapotranspiração da cultura e  $\Delta ARM$  é a variação do armazenamento em um determinado período de tempo.

### 2.5.2 Balanço de energia em uma superfície vegetada

O conhecimento do balanço de energia de uma superfície vegetada proporciona informações importantes para o estudo da evapotranspiração de uma cultura. O processo de evapotranspiração ocorre mediante a troca de energia entre a atmosfera, o solo e a superfície evapotranspirante, e depende fortemente da quantidade de energia disponível. Partindo-se do princípio da conservação de energia na superfície vegetada, o balanço de energia de uma cultura agrícola pode ser descrito pela equação 9 (BEZERRA, 2006):

$$Rn - G = H + LE \quad (9)$$

Em que  $Rn$  é a radiação líquida e  $G$ ,  $H$  e  $LE$  são as densidades de fluxos de calor no solo, sensível e calor latente, respectivamente.

Nessa forma simplificada da equação do balanço de energia consideram-se apenas os fluxos verticais, de modo que os fluxos horizontais, transferidos pelo processo de advecção, são desprezados. Nesse sentido, a aplicação da equação 9 deve se restringir a áreas extensas e de vegetação homogênea. Outros componentes, como a energia armazenada ou liberada pela

planta e a energia utilizada para a realização dos processos metabólicos são também desconsiderados, pois representam apenas uma pequena parcela da energia disponível quando comparados com os outros termos (ALLEN et al., 1998).

No entanto, o balanço de energia de uma superfície vegetada revela a maneira como a energia disponível é dividida para cada um dos fluxos H, LE e G. Dessa maneira, é possível avaliar a importância relativa de cada componente, que pode ser caracterizada pelas razões LE/Rn, H/Rn e G/Rn (PAÇO, 2006). Dentre essas, as frações do saldo de radiação utilizadas como fluxos de calor latente e calor sensível (LE/Rn e H/Rn) podem ser indicativos do estado hídrico da planta e do solo (COSTA, 2007).

### 2.5.3 Correlações turbulentas

O método das Correlações Turbulentas foi proposto por Swinbank em 1951 (SWINBANK, 1951) e constitui uma técnica direta de medida dos fluxos verticais da camada limite atmosférica em consequência das trocas turbulentas, características desta camada, baseado nas covariâncias entre as medidas das flutuações das variáveis utilizadas, obtidas pelo produto dessas flutuações (ARYA, 1988).

Apesar da praticidade da técnica, há necessidade do uso de sofisticados instrumentos de alta frequência, bastante dispendiosos. Porém, isso não tem impedido que a sua utilização tenha se tornado amplo em âmbito mundial (PAÇO, 2006).

Uma condição necessária para a aplicação desse método é garantir que no plano horizontal a superfície seja uniforme, de modo que não se verifique o efeito de advecção. Para a descrição do fundamento teórico desse método, parte-se da premissa de que o valor das flutuações de uma variável meteorológica, por exemplo, a velocidade do vento ( $w$ ), é dada pela diferença entre o seu valor real e o seu valor médio, isto é:

$$w' = w - \bar{w} \quad (10)$$

Em que, segundo Stull (1988),  $w'$  representa a parte do escoamento que varia com períodos menores que, aproximadamente, uma hora (desvios) e  $\bar{w}$ , valor médio ou estacionário, representa a parte que varia com um período maior que, aproximadamente, uma hora.

A ocorrência de desvios em torno do valor médio de uma variável atmosférica ( $S$ ) se dá devido a presença de turbilhões ou vórtices, que atuam no transporte das propriedades neles contidas. Segundo OKE (1987), tais propriedades dizem respeito à sua massa,

determinada pela sua densidade (d), se considerar uma unidade de volume; à velocidade vertical do vento (w) e ao conteúdo volumétrico de qualquer variável (s).

Desde que seja possível a obtenção de suas respectivas médias e de seus respectivos desvios, a densidade do fluxo vertical médio de uma variável qualquer (S), transportada em um turbilhão, pode ser escrita como:

$$S = (\overline{\rho + \rho'}) (\overline{w + w'}) (\overline{s + s'}) \quad (11)$$

Expandindo esta equação, segue-se que:

$$\begin{aligned} S &= (\overline{\rho w + \rho w' + \rho' w + \rho' w'}) (\overline{s + s'}) \\ S &= \overline{\rho w s + \rho w' s + \rho' w s + \rho' w' s} + \overline{\rho w s' + \rho w' s' + \rho' w s' + \rho' w' s'} \\ S &= \overline{\rho w s} + \overline{\rho w' s} + \overline{\rho' w s} + \overline{\rho' w' s} + \overline{\rho w s'} + \overline{\rho w' s'} + \overline{\rho' w s'} + \overline{\rho' w' s'} \\ S &= \overline{\rho w s} + \overline{\rho w s'} + \overline{\rho w' s} + \overline{\rho w' s'} + \overline{\rho' w s} + \overline{\rho' w s'} + \overline{\rho' w' s} + \overline{\rho' w' s'} \end{aligned} \quad (12)$$

Com a aplicação de algumas definições é possível simplificar a equação 12. De acordo com as médias de Reynolds, a média de um desvio é considerada nula (Stull, 1988) (termos  $\overline{\rho w s'}$ ,  $\overline{\rho w' s}$  e  $\overline{\rho' w s}$ ). Do mesmo modo, considerando-se a  $\rho$  constante na camada inferior da atmosfera, os termos  $\overline{\rho' w s'}$ ,  $\overline{\rho' w' s}$ ,  $\overline{\rho' w' s'}$  são desprezados.

Para uma superfície horizontalmente homogênea, a quantidade de ar ascendente é aproximadamente igual à quantidade de ar descendente. Este fato é uma decorrência de que a velocidade vertical média ( $\overline{w}$ ) é desprezível. Assim, a Equação (12) resulta em:

$$S = \overline{\rho w' s'} \quad (13)$$

Em que  $\overline{w' s'}$  simboliza a covariância instantânea entre as variáveis w e s. Em se tratando dos fluxos de calor sensível e calor latente, a equação (13) é substituída pelas que seguem (OKE, 1978):

$$H = \rho c_p \overline{w' T'} \quad (14)$$

e

$$LE = L_v \overline{w' q'} \quad (15)$$

Em que  $\rho$  corresponde à massa específica ar úmido ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  ao calor específico do ar à pressão constante ( $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $L_v$  ao calor latente de vaporização ( $\text{J kg}^{-1}$ ) e  $\overline{w' T'}$  e  $\overline{w' q'}$  às covariâncias entre a velocidade vertical do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e a temperatura do ar ( $^\circ\text{C}$ ) e a velocidade vertical do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e a massa específica do vapor d'água ( $\text{kg m}^{-3}$ ), respectivamente.

Em uma pesquisa realizada por PAÇO (2006), em um pomar de pessegueiros (*Prunus persica* L.) localizado na região de Montijo, Portugal, que tinha por objetivo determinar a evapotranspiração da cultura visando encontrar meios de aperfeiçoar a irrigação na referida cultura, a ETc, medida pelo método das correlações turbulentas, em 1998, variou entre 1,4 e 3,6 mm dia<sup>-1</sup> e no ano de 1999, os valores estiveram entre 2,1 e 3,3 mm dia<sup>-1</sup>.

O método das correlações turbulentas também foi utilizado por Simmons et al. (2006) com o objetivo de avaliar a precisão de duas outras técnicas micrometeorológicas (Análise de Renovação da Superfície (RS) e *One propeller eddy covariance* (OPEC)) para o cálculo da ETc diária e sazonal de um pomar de noqueiras (*Carya illinoensis*), localizado nas proximidades de Las Cruces, Novo México, Estados Unidos, nos ciclos de 2004 e 2005. Os valores diários do LE OPEC e do LE RS foram subestimados quando comparados ao LE medido pelo método das correlações turbulentas em cerca de 8% e 11%, respectivamente. Porém, o estudo mostrou que os sistemas OPEC e RS são adequados para medida da evapotranspiração de pomares de noqueiras.

No Brasil, o uso do método das correlações turbulentas em cultivos agrícolas não é comum. Esta técnica tem sido muito aplicada em regiões florestais, a exemplo das pesquisas ligadas ao Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia – LBA. Segundo Manzi & Santos (2004), esse experimento possui um amplo programa de coleta de dados micrometeorológicos de medidas de fluxos de energia, CO<sub>2</sub> e vapor de água operando 14 torres em dez localidades. As torres estão distribuídas em diversos tipos de clima, regime de precipitação e de cobertura vegetal, incluindo áreas de floresta e savana alagadas, floresta de transição (cerradão) e cerrado no Centro-Oeste.

Arruda et al. (2006) obtiveram a evapotranspiração de uma região de transição entre floresta tropical úmida e cerrado, localizada no município de Sinop, Mato Grosso, por meio do método das correlações turbulentas e da razão de Bowen no período de maio de 2002 a fevereiro de 2003. Seus resultados mostraram uma subestimativa dos valores da evapotranspiração obtidos usando o método da razão de Bowen quando comparados àqueles medidos pelo método das correlações turbulentas.

Costa (2007) usou o método das correlações turbulentas para estimar a evapotranspiração em um pomar bananeiras na chapada do Apodi no município de Quixeré, Ceará, e concluiu que a utilização do método para a obtenção dos fluxos de calor sensível e latente não fechou a equação do balanço de energia. A autora acredita que o não fechamento do balanço foi devido à subestimativa do fluxo de calor latente por esse método. Fato esse,



também observado por TWINE et al. (2000), atribuído ao uso de instrumentos bastantes sensíveis.

#### **2.5.4 SEBAL**

De acordo com Allen et al. (2002), todos os métodos mencionados anteriormente são de grande confiabilidade, pois são capazes de oferecer medidas com boa precisão. Porém, ainda de acordo com o autor, os mesmos apresentam limitações quando se pretende fazer estimativas da evapotranspiração para grandes áreas, pois essas estimativas feitas com esses métodos são baseadas em dados pontuais para um local específico e são integradas para a área que envolve o local da medição, considerando-se que a evapotranspiração é uniforme na referida área. O fator complicador é que provavelmente deve existir numa área irrigada com diferentes culturas, com alturas diferenciadas, em diferentes fases fenológicas, com diferentes suprimentos hídricos e todos esses fatores são determinantes na evapotranspiração, o que não é aconselhável considerá-la uniforme em escala regional (BEZERRA, 2006).

Essas limitações têm motivado a utilização da técnica de sensoriamento remoto através de dados radiométricos obtidos a partir de imagens de satélites, já que os mesmos são capazes de cobrir grandes áreas, e a obtenção da evapotranspiração em escala regional mostrando variações da mesma dentro de uma grande área já é uma realidade (MEDINA et al., 1998; BASTIAANSEN et al., 1998; FEITOSA, 2005).

Nesse sentido, os modelos aplicados a técnicas de sensoriamento remoto apresentam-se como uma alternativa visando operacionalizar as estimativas dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração. Entre os modelos semiempíricos mais recentes, destacam-se o algoritmo do balanço de energia para a superfície terrestre (Surface Energy Balance Algorithm for Land – SEBAL) (BASTIAANSEN, 1995).

O SEBAL é um algoritmo que utiliza imagens de satélite e poucos dados de superfície para estimar a radiação líquida, os fluxos de calor latente, sensível e no solo. O método faz uso apenas das radiâncias espectrais registrados em sensores de satélites e de um conjunto mínimo de dados meteorológicos que incluem a velocidade do vento e a temperatura do ar para resolver o balanço de energia à superfície da terra (COURAULT et al., 2002).

De acordo com Bastiaansen (2000), apesar do algoritmo SEBAL ser fundamentado em formulações empíricas, os resultados da validação do mesmo em experimentos de campo têm mostrado que o erro relativo na fração evaporativa foi de 20%, 10% e 1% nas escalas de

1km, 5 km e 100 km, respectivamente. O autor espera que o SEBAL apresente melhores resultados em escala regional, como também em áreas com superfície heterogênea.

Kimura et al. (2007) comentam que o SEBAL vem sendo bastante testado em áreas irrigadas em diferentes partes do globo, porém poucas referências são encontradas quando se investiga a estimativa da evapotranspiração da vegetação nativa de regiões semi-áridas pelo emprego deste algoritmo. Esses autores aplicaram e validaram o SEBAL na estimativa da ET diária de vegetação nativa em bacia na região de Loess Plateau, na China, empregando procedimento descrito por ALLEN et al. (1998) e BASTIAANSSEN et al. (1998).

Meireles (2007) aplicou o SEBAL na estimativa da evapotranspiração real, utilizando imagem do satélite TM-Landsat 5 na bacia do Acaraú – CE. Bastiaanssen & Zwart (2007) utilizaram o SEBAL para determinar a evapotranspiração, produção de biomassa e produtividade da água no Vale Yaqui, México.

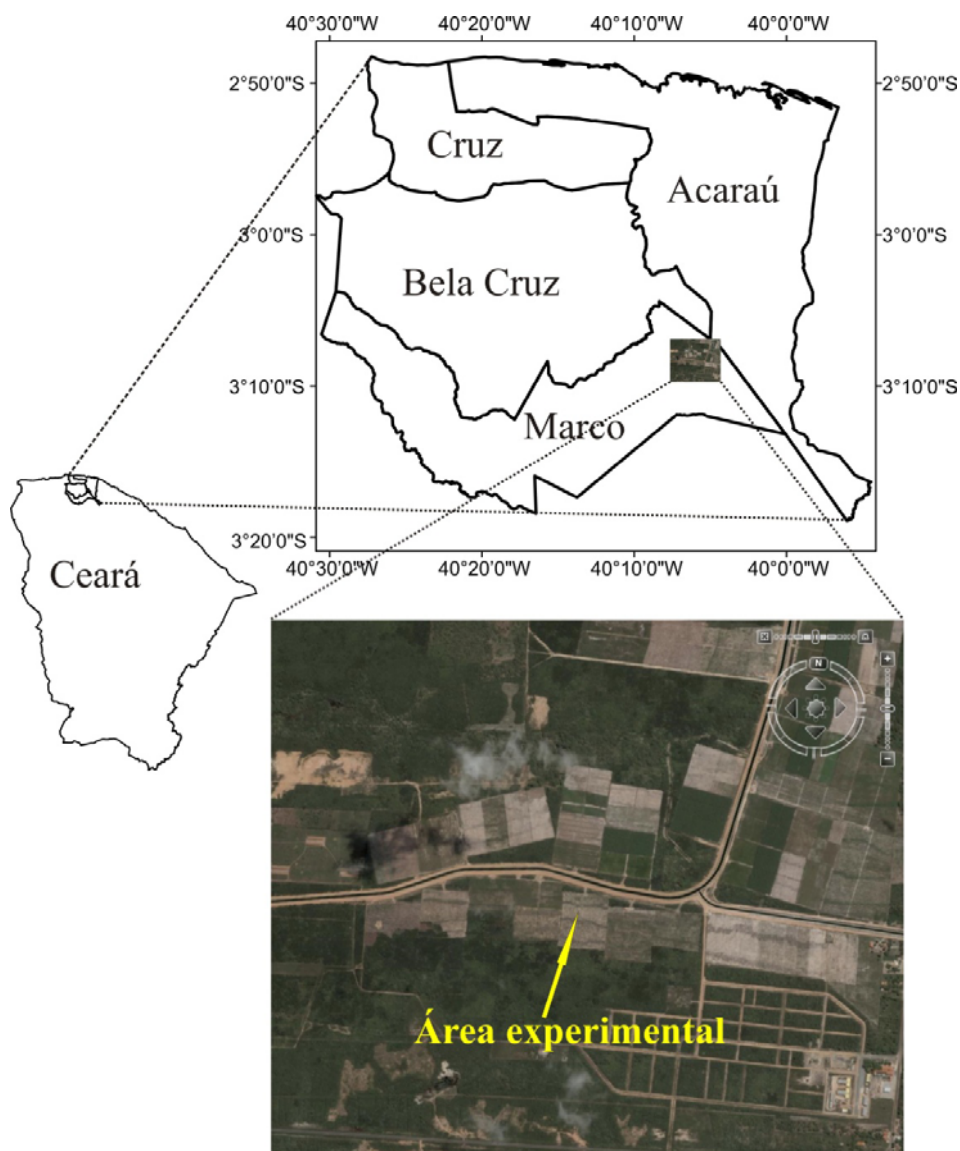
Moreira (2007) usou o SEBAL para avaliar o balanço de radiação e a evapotranspiração horária em três regiões no estado do Ceará (Região do Baixo Acaraú, Região da Chapada do Apodi e Região da Chapada do Araripe) concluindo que na estimativa de ET, o SEBAL se mostrou bastante eficiente apresentando resultados significativos demonstrando a existência de uma variabilidade local e regional na evapotranspiração.

Teixeira et al. (2009) calibrou e validou o SEBAL com medições em campo através de estações micrometeorológicas na região semi árida da bacia do São Francisco. As características analisadas foram: albedo, temperatura e emissividade da superfície, fluxo de calor no solo, gradiente de temperatura do ar, fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e evapotranspiração. O autor concluiu que a maioria das equações do algoritmo necessita de pequenas correções, observou também que é preciso uma melhor discussão quando se converte evapotranspiração instantânea para uma escala diária.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido em um lote de área de 1 há, cultivado com melancia irrigada por gotejamento, localizado no Perímetro Irrigado Baixo Acaraú. O Perímetro de irrigação está situado na região norte do estado do Ceará (Figura 01), entre os Municípios de Marco, Bela Cruz e Acaraú (Latitude: 3°07'13" S, Longitude: 40°05'13" W), com clima Aw' (tropical chuvoso) segundo a classificação de Köppen; e possui um potencial imediato para a irrigação de mais de 8.000 ha com culturas de elevado valor econômico, além de mais 4.000 ha da ampliação aprovada pelo PAC (Programa de Aceleração do Crescimento) do Governo Federal.



**Figura 01** – Localização da Área de estudo

O solo, classificado como Neossolo Quartzarênico, caracteriza-se por apresentar elevada capacidade de infiltração e baixa capacidade de retenção de água, o que o pré-dispõe a uma elevada perda de água por percolação, reduzindo assim o potencial da eficiência de irrigação; tendo como consequência ambiental a percolação para o lençol freático de nutrientes, além da própria ascensão do lençol, conforme verificado por ANDRADE et al.(2009).

A análise granulométrica e as determinações das densidades foram realizadas, respectivamente, no Laboratório de Água e Solos do Departamento de Ciências do Solo e no Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará. Os valores de areia, silte, argila, densidade e a classe textural para as profundidades de interesse são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Granulometria (areia, silte e argila), classe textural e densidades dos horizontes pedológicos.

Horizonte Prof.(cm)	Composição Granulométrica (g kg <sup>-1</sup> )				Classificação Textural	Densidade (kg m <sup>3</sup> )
	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila		
7,5	537	338	62	63	Areia franca	1580
22,5	541	341	32	86	Areia franca	1630
37,5	447	355	55	143	Franco arenosa	1520
52,5	503	275	112	110	Franco arenosa	1510

FONTE: Laboratório de Água e Solos, UFC, 2009; Laboratório de Hidráulica e Irrigação, UFC, 2009.

### 3.2. Descrição da cultura a ser estudada

A melancia foi plantada em uma área de 1 ha no dia 01/11/2008 com espaçamento de 0,30 m entre covas e 3 m entre linhas. A cultivar plantada na área foi a Crimson Sweet que, durante seu ciclo, foi adubada de acordo com as recomendações técnicas, sem submissão a estresse hídrico.

### **3.3. Irrigação**

O sistema de irrigação foi formado por um conjunto motor-bomba de 3 cv; uma tubulação principal de 106,0 m com tubos de PVC de 75 mm; uma linha de derivação de 96,0 m com tubos de PVC de 50 mm e 32 linhas laterais de 110 m formadas por uma fita gotejadora de polietileno de 18 mm de diâmetro, com espaçamento entre gotejadores de 30 cm, com vazão de 1,49 L h<sup>-1</sup> a uma pressão de serviço de 80 kPa.

O sistema era acionado três vezes ao dia com um tempo de funcionamento de 35 min cada pulso de irrigação, até dia 16 de dezembro de 2008. A partir do dia 17 de dezembro de 2008, a irrigação foi feita em quatro pulsos com 20 min. O aumento da irrigação se deu devido ao maior consumo de água pela cultura ocasionada pelo início da formação dos frutos. O sistema de irrigação permitia, pelo seu dimensionamento, a irrigação de 0,5 ha por vez, sendo o controle realizado por um cavalete dotado de registros de fecho rápido.

### **3.4. Cobertura foliar**

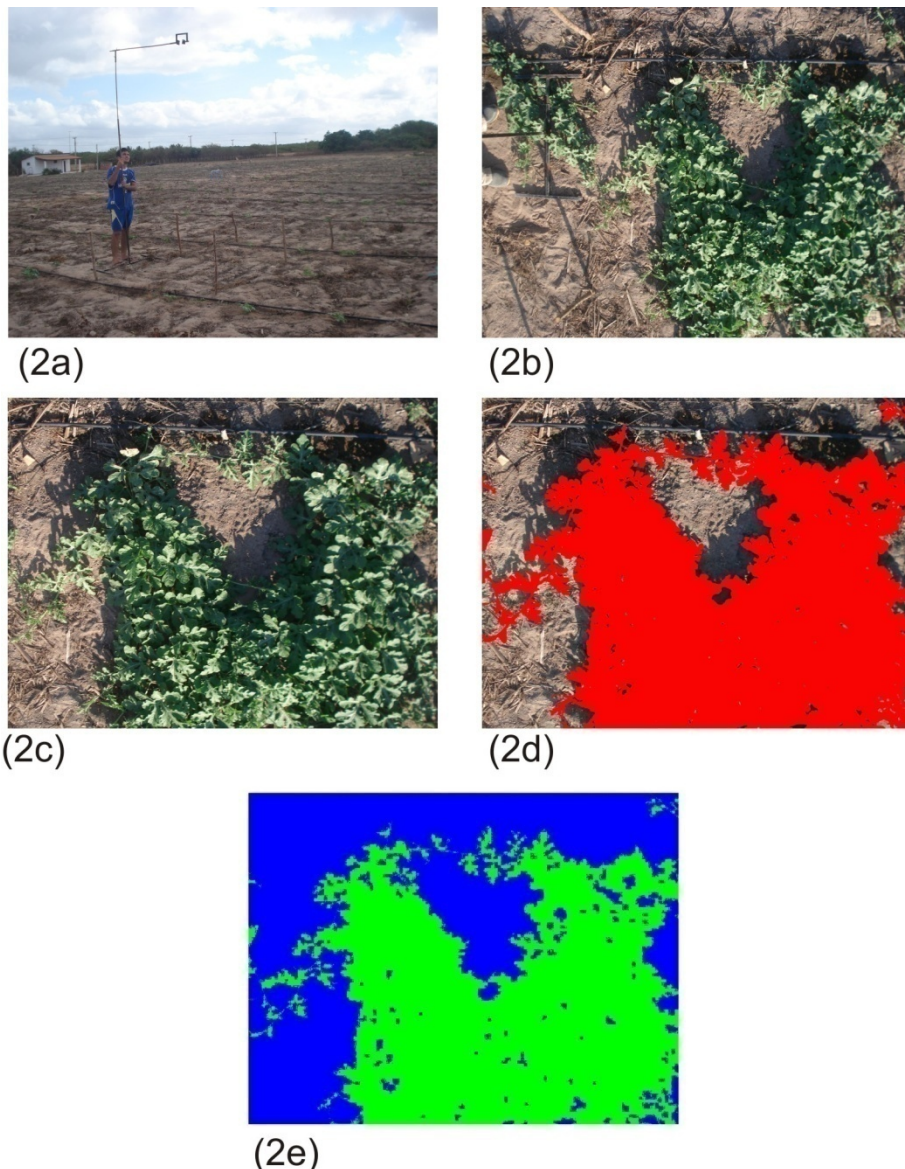
Para acompanhamento da cobertura foliar foram utilizadas fotografias digitais de oito plantas divididas em quatro parcelas de duas, distribuídas na área com desenvolvimento vegetativo normal, obtidas nos respectivos dias após plantio (DAP): 08; 15; 19; 22; 26; 29; 34; 36; 41; 44; 47. Foi utilizada uma câmera digital de 5.1 megapixels para obtenção das fotografias.

Para a avaliação da área da projeção da copa da melancia, foram obtidas imagens da área com presença de folhas ao meio dia, correspondendo ao horário ideal para aquisição de imagens devido à projeção da sombra das folhas no solo ser quase totalmente perpendicular.

Para delimitar a área a ser fotografada, foram fixados piquetes nas extremidades de cada parcela experimental com dimensões de 0,90 m entre plantas, incluindo duas dessas, e 3 m entre fileiras a fim de se ter a cobertura total da planta no solo de acordo com o espaçamento da cultura. Para facilitar o recorte das fotografias foram amarrados barbantes entre os piquetes fazendo assim a delimitação da área de interesse. Para cada parcela, foram obtidas duas fotografias a partir das quais foi feito mosaicos com o auxílio de software de edição de imagens. As fotografias foram tomadas a uma altura aproximada de 2 m em relação à superfície do solo, com auxílio de uma estrutura metálica (Figura 2a). Utilizando um editor

de imagens, realizou-se o corte das fotografias e, em seguida, o mosaico, admitindo somente a área representativa de 2,7 m<sup>2</sup> por plantas.

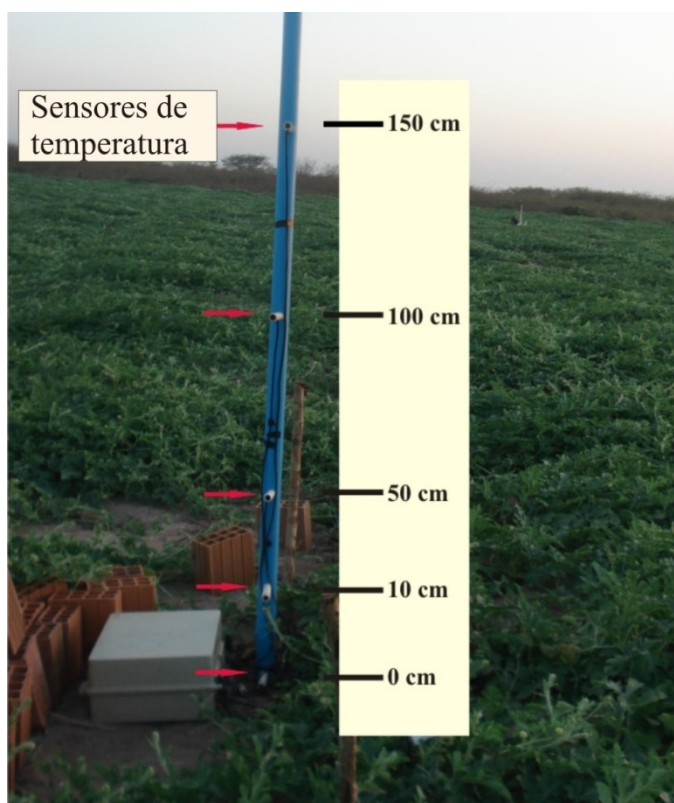
O acompanhamento da evolução da cobertura do solo foi realizado através do processamento de imagens, regularmente registradas, no programa de tratamento de imagens PHOTOSHOP ADOBE versão 7.0, para proporcionar na área da parcela estudada um contraste entre as áreas cobertas e desnudas do solo. Para a quantificação da cobertura do solo, realizou-se a classificação supervisionada de cada imagem pelo método da Máxima Verossimilhança no software ENVI 4.3. A Figura 2 expõe a evolução do processo.



**Figura 02** - (2a) Estrutura para obtenção da imagem no campo – (2b) imagem obtida – (2c) imagem com área delimitada – (2d) imagem trabalhada em um editor de imagens – (2e) – imagem classificada no ENVI 4.3 a partir da imagem trabalhada no editor.

### 3.5. Evolução da temperatura do ar em diferentes níveis a partir da superfície

A temperatura do ar foi monitorada em cinco níveis a partir da superfície do solo (Figura 03) nos dias 17/12/2008 (47 DAP) e 02/01/2009 (63 DAP). Os sensores de temperatura instalados foram do tipo LM 35 da National. Esses sensores foram instalados em um tubo de PVC perfurado, posteriormente fixados ao solo. Os níveis de altura monitorados foram: 0, 10, 50, 100 e 150 cm a partir da superfície do solo. Os dados de temperatura foram coletados e armazenados no sistema de aquisição e armazenamento de dados CR 1000 da Campbell Scientific, a cada 15 minutos.



**Figura 03** – Torre de PVC onde foram instalados os sensores.

### 3.6 Evapotranspiração com balanço hídrico no solo

#### 3.6.1. Determinação da curva de retenção da água no solo

As curvas de retenção de água no solo foram obtidas para as camadas 0 – 15 cm; 15 – 30 cm; 30 – 45 cm e 45 – 60 cm. No campo, foi coletada uma amostra de solo indeformada mais uma repetição para ponto médio de cada camada: 7,5 cm; 22,5 cm; 37,5 cm e 52,5 cm, de forma a garantir maior representatividade da camada em avaliação (Figura 04a).



Em laboratório, as amostras foram saturadas por capilaridade e, em seguida, levadas para o funil de Haines onde foi determinada a umidade com auxílio de uma balança de precisão para tensões menores: 0,19; 0,98; 1,96; 2,94; 3,92; 4,90; 5,88; 6,86; 7,84 e 8,82 kPa.

Utilizou-se o aparelho de Richards ou câmara de sucção para extrair a umidade nas maiores tensões 9,80; 19,6; 29,41; 49,03; 73,54; 98,06; 147,09 e 294,19 kPa (Figura 04b). O aparelho é constituído de câmaras que contêm placas porosas de alta pressão de entrada de ar. Essas placas são elementos que, em determinada pressão, não permitem a passagem de ar e seus vazios estão em comunicação com a fase líquida (água) das amostras de solo.

O ensaio consiste na colocação do corpo de prova em contato direto com as placas porosas de alta pressão de entrada de ar saturadas, sendo as amostras submetidas a sucessivas pressões de ar, assumidas como o valor de sucção matricial gradualmente maior, configurando um procedimento de secagem. As amostras tendem a perder água até que um equilíbrio se estabeleça o que é verificado por meio de pesagem dessas amostras. Na condição final de equilíbrio, a pressão de ar aplicada é igual à sucção matricial do solo (MIGUEL et al., 2006).



**Figura 04** – a) Coleta de amostras indeformada em campo e b) Câmaras de pressão de Richards.

Depois de obtida a umidade para cada tensão, foi feito o ajuste dos dados à equação de Van Genuchten (Equação 4) e calculados seus parâmetros com auxílio do Software SWRC (Soil Water Retention Curve) da ESALQ (Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”).



### 3.6.2. Determinação da função $K(\theta)$ - método do perfil instantâneo

Para a obtenção da equação que permite calcular os valores de  $K(\theta)$ , foi realizado um ensaio em campo ao lado da área experimental, em uma área de 8 m x 8 m, onde no centro foram instalados duas baterias de tensiômetros de mercúrio e sensores capacitivos de umidade do solo com a seguinte disposição espacial: Bateria 1 (Camada 0 – 15 cm) 1 tensiômetro no centro com 2 sensores de umidade ao lado distanciados 15 cm da cápsula porosa. A mesma disposição de tensiômetro e sensores foi mantida nas camadas 15 – 30; 30 – 45 e 45 – 60 cm com um espaçamento de 20 cm entre tensiômetros. A Bateria 2 foi instalada a 30 cm da Bateria 1 mantendo o mesmo arranjo de sensores e tensiômetros, invertendo somente o sentido das profundidades (maior para menor) Figura 05.



**Figura 05** – Parcela experimental em campo para determinação do  $K(\theta)$ .

A quadrícula foi saturada e coberta com uma lona de polietileno preta para evitar perdas por evaporação. Foram realizadas leituras da altura da coluna de mercúrio e da frequência de cada sensor duas vezes ao dia, às 6 e 18 horas. As leituras foram realizadas no período de 24 de outubro a 29 de novembro de 2008. A equação que define a condutividade hidráulica do solo não saturado foi obtida conforme metodologia de HILLEL et al. (1972).

### 3.6.3. Calibração dos Sensores capacitivos em Campo e Laboratório

A calibração em Laboratório (laboratório gravimétrico) seguiu as seguintes etapas: foi coletada uma amostra indeformada de solo da área de estudo em cilindro de PVC com

diâmetro e altura de 30 cm, na profundidade de 0 – 30 cm. Em seguida, a amostra foi saturada por capilaridade e colocada em uma balança para monitoramento da variação de massa. À medida que o solo secava, eram feitas leituras da frequência de um sensor colocado à profundidade de 15 cm na amostra e do contador da célula de carga para posterior conversão em umidade segundo procedimento descrito por LEÃO (2005).

Para a calibração em campo (campo gravimétrico), foram coletadas amostras de solo com um trado próximo a sensores de umidade durante o ciclo da cultura. Em seguida, a umidade foi determinada pelo método gravimétrico e comparada às leituras em frequência dos sensores (CRUZ, 2009).

#### **3.6.4. Determinação da evapotranspiração pelo balanço hídrico**

O balanço hídrico no solo foi feito com base na equação 08. De acordo com essa equação as entradas são: ( $I$ ) irrigação, ( $P$ ) precipitação e ( $q \uparrow$ ) ascensão capilar. As variáveis de saída são: ( $q \downarrow$ ) percolação profunda e ( $ET_c$ ) evapotranspiração da cultura. As variáveis de entrada e saída são: ( $ES$ ) escoamento superficial e ( $\Delta ESS$ ) variação da água que flui horizontalmente através do escoamento sub-superficial. Por ser uma área plana de solo arenoso com bom manejo da irrigação localizada, as variáveis ( $ES$ ) e ( $\Delta ESS$ ) foram consideradas nulas.

A precipitação pluvial foi monitorada pela estação meteorológica do Distrito de Irrigação do Baixo Acaraú localizado próximo a área. Não foi observado nenhum evento de chuva durante o período de coleta dos dados, tornando essa variável também nula.

A percolação ou a ascensão capilar foi determinada com base na equação 05 de Darcy – Buckingham para as profundidades 15; 30; 45 e 60 cm, obtida através do produto entre a condutividade hidráulica não saturada e o gradiente de potencial. A variação do armazenamento da água no solo, no intervalo de tempo considerado, para as profundidades adotadas no balanço, foi obtida segundo a equação 04 de Reichardt (1988).

Portanto, a equação 08 do balanço hídrico passa a ser:

$$ET_c = I + q \uparrow - q \downarrow \pm \Delta SW \quad (16)$$

em que  $I$  é a irrigação,  $q \downarrow$  é a percolação profunda,  $q \uparrow$  é ascensão capilar e  $\Delta SW$  é a variação do armazenamento em um determinado período de tempo.

Para determinar a umidade e o gradiente de potencial total de água no solo e posteriormente fazer o balanço hídrico na melancia, foram instalados na área, sensores

capacitivos de umidade no centro da faixa úmida monitorando as camadas 0 – 15; 15 – 30; 30 – 45 e 45 – 60 cm.

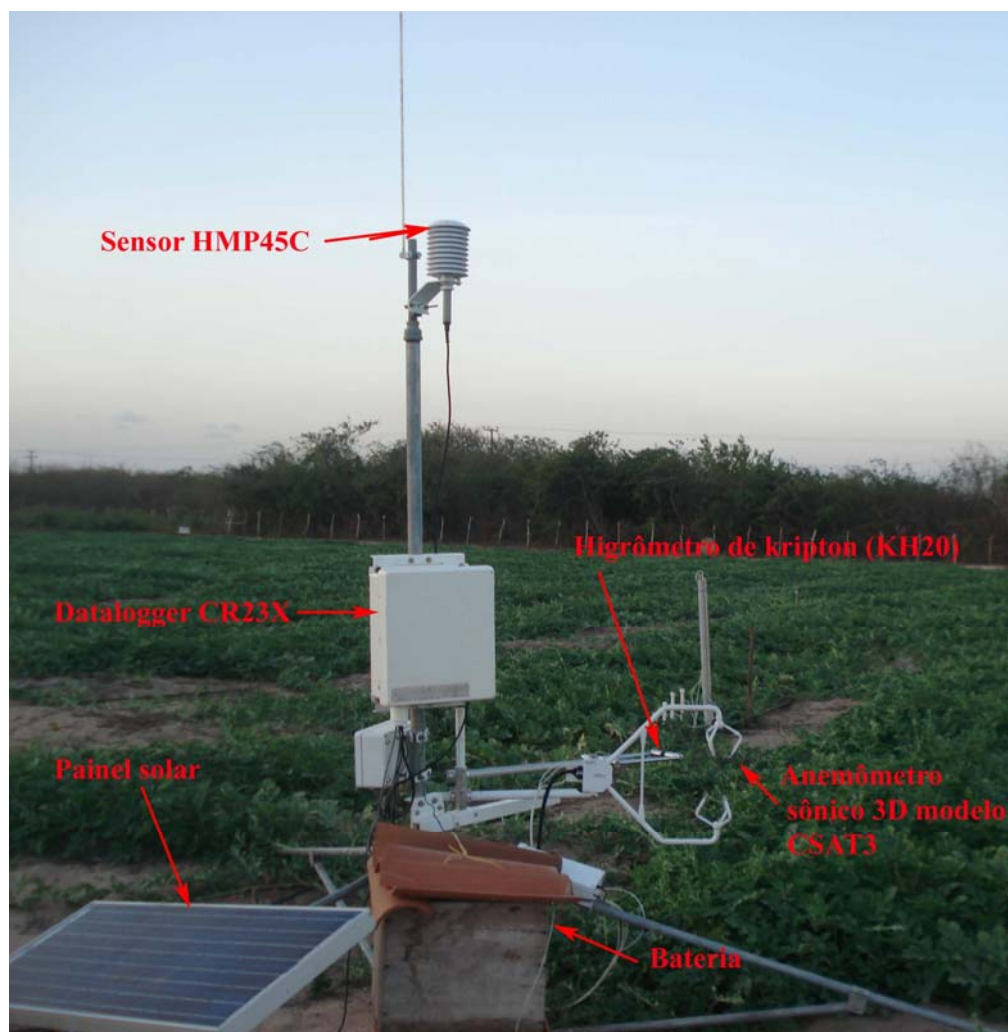
Os sensores estavam ligados a uma fonte contínua de energia elétrica. As leituras das frequências eram feitas a cada segundo e armazenadas em uma placa de aquisição de dados. Essas leituras foram feitas nos dias 17, 18 e 19/12/2008 (47, 48 e 49 DAP), respectivamente.

Foi utilizado um multiplexador para aquisição dos dados dos sensores, sendo que o arquivo de coleta era composto por 5 leituras (uma a cada segundo) do sensor da primeira profundidade, seguido de um intervalo de dois zeros e 5 leituras do sensor da segunda profundidade, repetindo-se o processo para terceira e quarta profundidade. Após um intervalo de 10 zeros recomeçava-se o ciclo de coleta. Para separação e análise dos dados foi desenvolvido um programa no Matlab 7.0.1 (em anexo).

### **3.7. Balanço de energia e evapotranspiração usando correlações turbulentas**

A Figura 06 mostra uma estação micrometeorológica com os instrumentos utilizados na pesquisa: um anemômetro sônico 3D modelo CSAT3 (Campbell Scientific Inc., Logan, EUA), posicionado na direção do vento dominante, que mediu a velocidade do vento nos três eixos (u, v, w) e a temperatura do ar (temperatura virtual sônica); um sensor HMP45C (Vaisala, Finlândia), que mediu a umidade relativa e a temperatura do ar; um higrômetro de kriptônio (KH20) que obtinha a concentração de vapor d'água e de gás carbônico.

Os sinais elétricos foram armazenados em um sistema de aquisição de dados, modelo CR23X (Campbell Scientific, Inc., Logan, EUA), programado para coletar os dados com frequência de 10 Hz e extrair médias e covariâncias a cada 15 min durante o período de 11 de dezembro 2008 a 5 de janeiro de 2009.



**Figura 06** – Estação Micrometeorológica

Os instrumentos foram instalados a 0,80 m de altura, dispostos em uma estação micrometeorológica colocada no centro da área de estudo de 100 x 100 m.

A coleta de dados teve início no 346º dia sequencial do ano (12/12/2008) e decorreu até o dia 5 (5/01/2009). A aplicação do método das correlações turbulentas pressupõe a existência de uma superfície homogênea e suficientemente extensa, para que possa garantir um “*fetch*” adequado para as medições (distância entre o local de medição e o extremo/borda da parcela de ar). A indicação da razão entre a altura de medição e o “*fetch*” deve ser igual ou inferior a 1:100, de acordo com SCHMID (2002).

O fluxo de calor latente (LE) foi obtido segundo a técnica das correlações turbulentas, cuja equação, descrita na Seção 2.5.3, envolve a covariância entre os valores dos desvios da velocidade vertical do vento ( $w'$ ) e da concentração de vapor d'água ( $q'$ ) (Paço et al., 2006; Simmons et al., 2006), que foram medidos no nível de 0,80 m.

A medição do fluxo de calor sensível (H) foi realizada pelo mesmo sistema. A equação para determinar sua densidade, descrita na Seção 2.5.3, envolve a covariância entre

os valores dos desvios da velocidade vertical do vento ( $w'$ ) e da temperatura do ar ( $T'$ ), medidos também no nível de 0,80 m. As flutuações da temperatura do ar utilizada foram medidas pelo anemômetro sônico 3D (temperatura virtual sônica).

A partir da densidade do fluxo de calor latente, obteve-se a evapotranspiração da cultura da melancia, por meio da equação 17:

$$ET_c = \frac{LE}{L_v} \Delta t \quad (17)$$

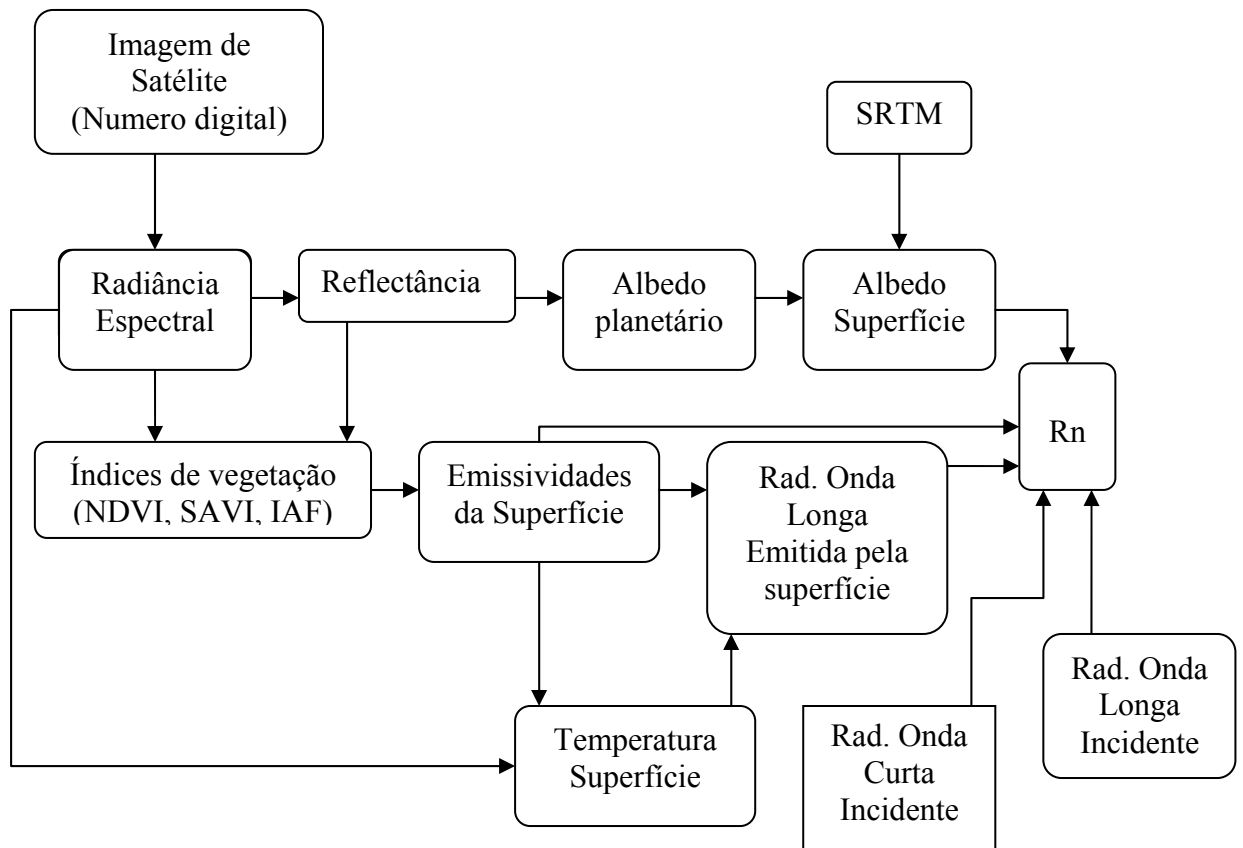
Em que  $L_v$  é o calor latente de vaporização ( $J\ kg^{-1}$ ) e  $\Delta t$  (s) o intervalo de tempo no qual as médias do LE foram geradas e armazenadas (15 min). A evapotranspiração real diária ( $mm\ dia^{-1}$ ) foi, então, obtida através da soma dos valores determinados pela equação 17 para cada intervalo de tempo.

### **3.8. Balanço de energia e evapotranspiração usando o algoritmo SEBAL e imagens do TM-LANDSAT 5.**

Os dados utilizados para aplicação do algoritmo SEBAL foram:

- As observações das bandas 1; 2; 3; 4; 5; 6 e 7 de duas imagens adquiridas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): órbita 218, ponto 62, referente a região de Acaraú com passagem do satélite no dia 17/12/2008 e 02/01/2009 no horário local de 09 h 45' 41".
- Os resultados do levantamento da superfície realizado pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) como estimativa da elevação do terreno na região de estudo;
- A velocidade do vento da estação micrometeorológica montada na área.

Depois de disponibilizados todos os dados procederam-se às etapas computacionais para a obtenção dos componentes do Balanço de Energia e da Evapotranspiração. A Figura 07 mostra a metodologia seguida para a obtenção da radiação líquida descrita por Moreira (2007). O algoritmo foi desenvolvido integralmente no software ArcMap®, exceto a etapa do cálculo do fluxo de calor sensível que foi realizada no software Matlab, o qual possibilita a programação do processo iterativo associado.



**Figura 07** – Desenvolvimento do algoritmo SEBAL

Com SEBAL são obtidos os diferentes componentes do balanço de energia, e com base no LE instantâneo a evapotranspiração diária.

Na sequência os procedimentos principais do algoritmo SEBAL são descritos, detalhando-se somente as etapas necessárias à análise dos resultados. Para descrição completa, podem ser consultados os trabalhos desenvolvidos por ALLEN et al. (2002), TREZZA (2002), BEZERRA (2006), MOREIRA (2007).

### 3.8.1 Saldo de radiação:

A radiação líquida foi calculada pela equação 18:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} - R_{L\uparrow} + \varepsilon_o R_{L\downarrow} \quad (18)$$

Em que  $\alpha$  é o albedo da superfície (adimensional),  $R_{s\downarrow}$  a radiação de onda curta incidente ( $W m^{-2}$ ),  $R_{L\uparrow}$  a radiação de onda longa emitida ( $W m^{-2}$ ),  $\varepsilon_o$  a emissividade da superfície (adimensional), e  $R_{L\downarrow}$  a radiação de onda longa incidente ( $W m^{-2}$ ).

A etapa preliminar é a calibração radiométrica e o cálculo das reflectâncias monocromáticas que permite calcular o albedo no topo da atmosfera. Devido às interações da

atmosfera na radiação solar, é necessário realizar correção do albedo no topo da atmosfera, em função da transmissividade atmosférica, calculada pela equação 19:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z \quad (19)$$

Em que  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica e  $z$  é a elevação do terreno (m).

Vários autores utilizam um valor médio de  $z$  na região de estudo, ou uma altitude representativa da cena. Neste trabalho, utilizaram-se os dados de elevação do terreno da SRTM, tendo assim uma melhor representação dos efeitos do relevo.

É necessário calcular também os índices de vegetação (sem dimensão) NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) e IAF (Índice de Área Foliar). O NDVI foi calculado pela equação 20:

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_{III}}{\rho_{IV} + \rho_{III}} \quad (20)$$

Em que  $\rho_{III}$  e  $\rho_{IV}$  são as reflectâncias das bandas 4 (infra vermelho próximo) e 3 (vermelho) do TM, respectivamente.

O cálculo do IAF (Índice de Área Foliar), que representa a razão entre a área total de todas as folhas contidas em dado pixel, pela área do pixel, foi feito por equação empírica sugerida por Allen et al. (2002) (equação 21):

$$IAF = \frac{-\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (21)$$

### 3.8.2 Fluxo de calor no solo

Para determinação do fluxo de calor no solo (estocado no interior do solo), calcula-se a razão  $G/R_n$ . Para pixels em corpos hídricos, ALLEN et al. (2002) recomendam  $\frac{G}{R_n} = 0,5$ , os demais pixels são calculados pela equação (22):

$$\frac{G}{R_n} = \left[ T_s (0,0038 + 0,0074 \alpha) (1 - 0,98 NDVI^4) \right] \quad (22)$$

Em que  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ),  $R_n$  a radiação líquida ( $W m^{-2}$ ),  $T_s$  a temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ ),  $\alpha$  o albedo da superfície (adimensional) e NDVI o índice de vegetação (adimensional) já citado.

### 3.8.3 Fluxo de calor sensível

A estimativa do fluxo de calor sensível ( $H$ ) é a etapa mais complexa do algoritmo SEBAL. Trata-se de um processo iterativo que foi programado no software Matlab. Nesse processo considera-se, inicialmente, que a atmosfera encontra-se em condições de estabilidade neutra. Nas demais iterações, correções são incluídas, em função de condições de estabilidade estimadas. Para maiores detalhes desse procedimento podem ser consultado os trabalhos: ALLEN et al. (2002), TREZZA (2002), BEZERRA (2006), MOREIRA (2007). O fluxo de calor sensível é calculado pela equação 23:

$$H = \frac{\rho C_p dT}{r_{ah}} \quad (23)$$

Em que:  $\rho$  é a massa específica do ar úmido ( $1,15 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  é o calor específico do ar ( $1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $dT$  é a diferença de temperatura entre a superfície e a região imediatamente superior (K) e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $\text{s m}^{-1}$ ).

No algoritmo SEBAL, assume-se que  $dT$  segue uma variação linear em função da temperatura de superfície (equação 24):

$$dT = a + bT_s \quad (24)$$

Devem ser escolhidos dois pixels característicos da região de estudo: o “pixel frio”, em uma área bem vegetada e irrigada, ou em corpo hídrico, onde se assume que o fluxo de calor sensível é nulo; e o “pixel quente”, em uma área de solo nu, seca, onde se considera que o fluxo de calor latente é nulo. Obtém-se um sistema de duas equações, cuja resolução fornece as duas incógnitas  $a$  e  $b$ , e permite obter  $dT$  para todos os pixels.

### 3.8.4 Fluxo de calor latente e evapotranspiração horária

Após o cálculo da radiação líquida e dos fluxos de calor na superfície, deduz-se o fluxo de calor latente pela Equação 9.

### 3.8.5 A evapotranspiração diária ( $\text{mm dia}^{-1}$ )

Para a obtenção da evapotranspiração diária, a primeira etapa foi calcular a evapotranspiração horária  $ET_h$ , dada pela razão entre o fluxo de calor latente,  $LE$ , obtido pela equação 9, e o calor latente de vaporização da água ( $L = 2,45 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ ), multiplicada por



3600, que é um fator de conversão de valor instantâneo para valor horário, conforme equação 25 (ALLEN et al., 2002, TREZZA, 2002):

$$ET_h = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (25)$$

Em que LE é o fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ),  $\lambda$  o calor latente de vaporização da água ( $2,45 \times 10^6 J kg^{-1}$ ) e o coeficiente 3600 vem da conversão de variável instantânea em variável horária.

Em seguida, foi obtida através da equação 26, a fração da evapotranspiração de referência horária,  $FET_{0\_H}$  que, de acordo com Trezza (2002), é relativamente constante em todo o período diurno.

$$FET_{0\_H} = \frac{ET_h}{ET_{0\_H}} \quad (26)$$

Em que  $ET_{0\_H}$  é a evapotranspiração de referência horária.

Considerando  $FET_{0\_H} = FET_{0\_24}$ , tem-se:

$$FET_{0\_H} = FET_{0\_24} = \frac{ET_H}{ET_0} = \frac{ET_{24}}{ET_{0\_24}} \quad (27)$$

Dessa forma, a evapotranspiração diária foi calculada pela equação 28 conforme Trezza (2002):

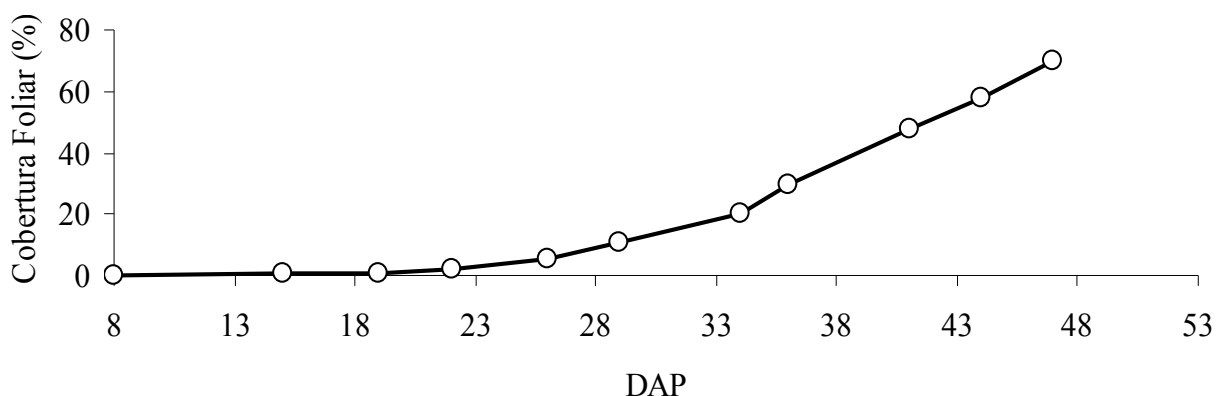
$$ET = FET_{0\_24} \cdot ET_{0\_24} \quad (28)$$

Tanto a evapotranspiração de referência diária,  $ET_{0\_24}$ , quanto a evapotranspiração de referência horária,  $ET_{0\_H}$ , foram calculadas pelo método da FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), utilizando dados da estação da FUNCEME em Acaraú. Os valores de  $ET_{0\_H}$  foram calculados no intervalo de 9h e 10h (tempo legal local), intervalo de tempo que compreende a passagem do satélite.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Cobertura Foliar

A Figura 08 apresenta a cobertura foliar da melancia obtida através de fotografias digitais. Nota-se que o desenvolvimento vegetativo da cultura foi relativamente lento até o 27º dia após o plantio (duração de 27 dias), o que representa 10% de cobertura do solo (fase inicial) e muito rápido na fase de crescimento das ramas (do 28º ao 47º DAP – duração 19 dias), correspondente a 70% de cobertura do solo (fase de crescimento). Não foi possível observar a fase intermediária e final já que as fotografias foram tiradas até o 47º DAP. Os resultados diferiram dos observados por Miranda et al. (2006) para a mesma cultura, obtendo uma duração de 23 e 14 dias nas fases inicial e crescimento, respectivamente.



**Figura 08** – Cobertura foliar da melancia.

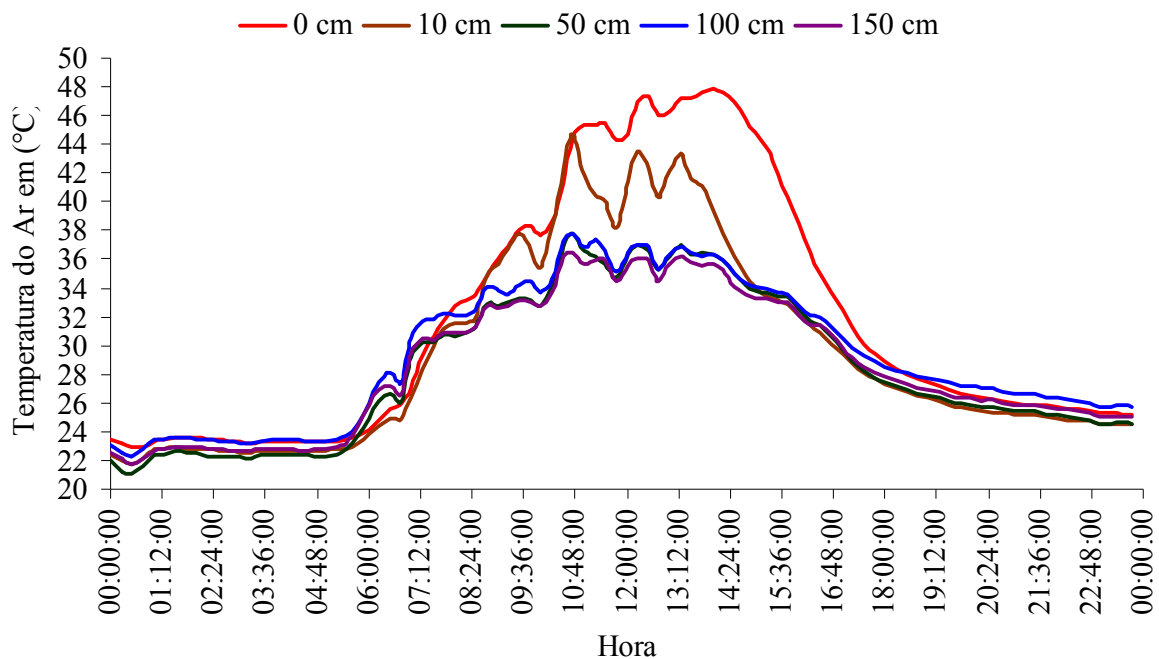
### 4.2 Temperatura do ar

A temperatura do ar foi monitorada em cinco níveis a partir da superfície, nos dias 17/12/2008 (351 DJ) e 02/01/2009 (02 DJ). Nas Figuras 09 e 10 pode ser observado que a temperatura no início do dia não apresentou variações significativas, permanecendo em torno de 23 °C. A temperatura começa a aumentar depois de 6 h da manhã quando o Sol começa a aquecer e volta a diminuir a partir de 18 h quando o Sol se põe. No nível de superfície a temperatura foi sempre superior aos demais níveis, como pode ser observado nas figuras. No dia 02/01/2009, aproximadamente ao meio dia, a temperatura da superfície foi inferior a temperatura a 10 cm de altura, fato que pode ser atribuído ao resfriamento do solo provocado pelas irrigações feitas em horários próximos ao considerado.

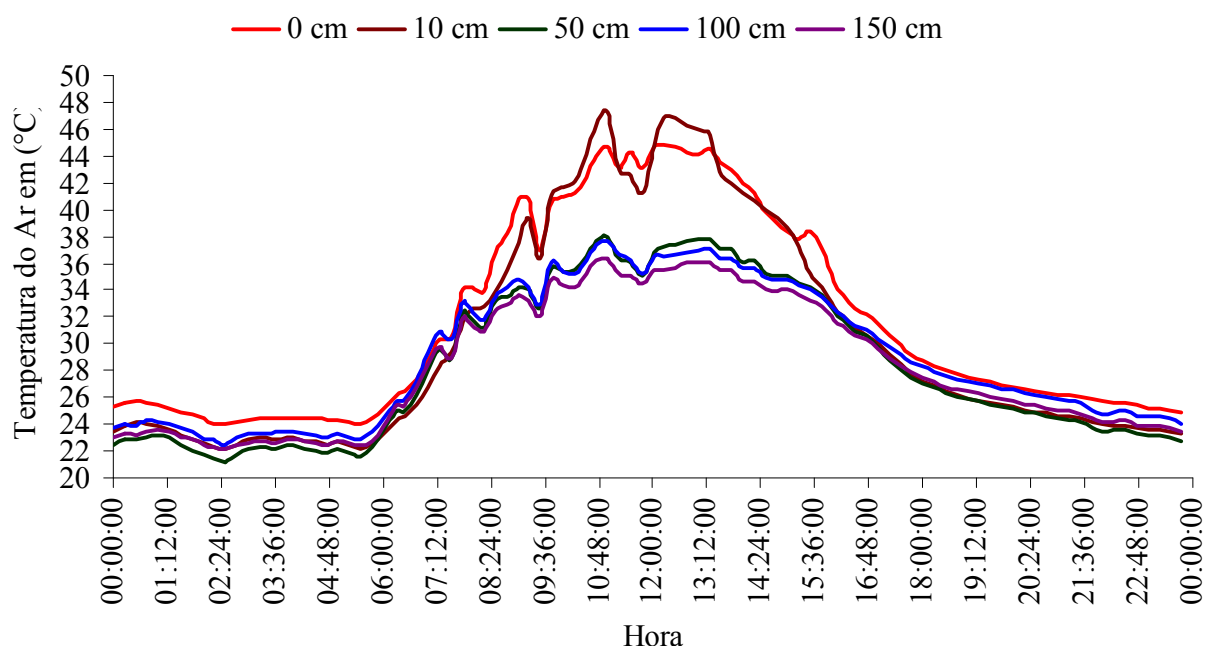
Ainda no nível de superfície do solo, o período em que a temperatura esteve mais elevada durante o dia foi entre 10 e 16 h sendo superior a 40 °C, atingindo uma temperatura máxima de 47 °C por volta das 14 h, no dia 17/12/2208. No outro dia analisado a temperatura da superfície passou a ser superior a 40 °C a partir das 9 h da manhã voltando a ser inferior as 14 h, com máxima de 44,8 °C exatamente às 12 h.

A temperatura a 10 cm a partir da superfície foi maior do que as dos níveis 50, 100 e 150 cm para ambos os dias. Nesse mesmo nível, no período entre 10 e 14 h, ela foi sempre superior a 40 °C. A máxima a 10 cm, no primeiro dia, foi de 44,6 °C e no segundo dia 47,2 °C as duas ocorrendo exatamente as 11 h.

Nos níveis 50, 100 e 150 cm o comportamento da temperatura foi semelhante. Esses três níveis tiveram uma diferença média, em relação à superfície e a 10 cm, em torno de 4 °C, no período do dia em que a temperatura foi mais elevada.



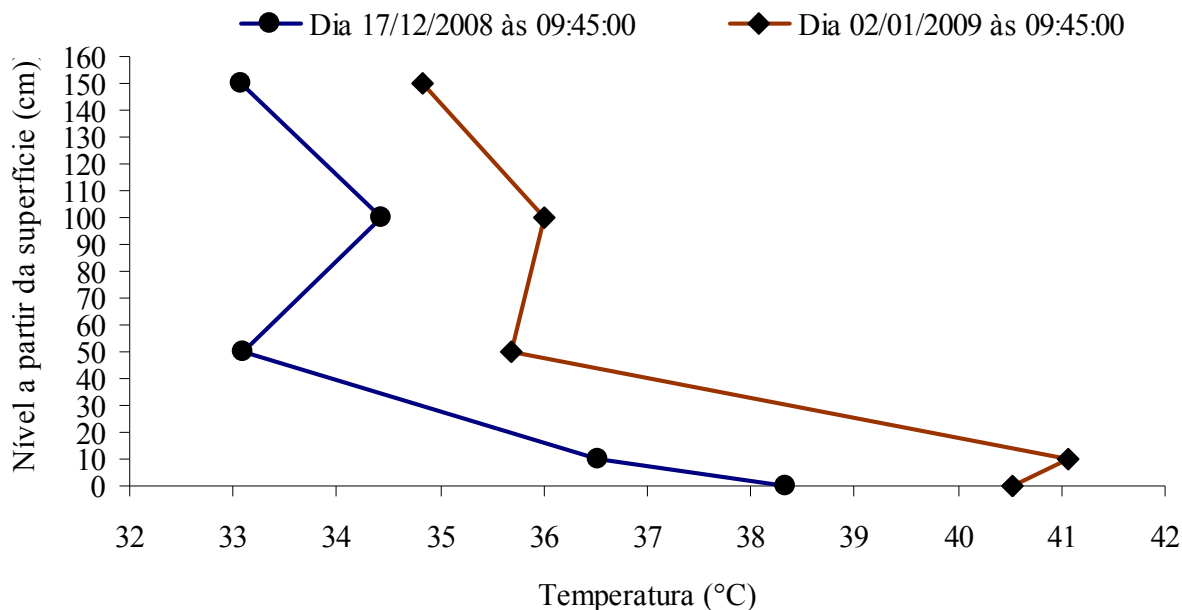
**Figura 09** - Variação horária da temperatura do ar nos níveis de 0, 10, 50, 100 e 150 cm de altura na área de melancia para o dia em 17/12/2008.



**Figura 10** - Variação horária da temperatura do ar nos níveis de 0, 10, 50, 100 e 150 cm de altura na área de melancia para o dia em 02/01/2009.

A Figura 11 apresenta a temperatura medida pelos sensores instalados na área, nos cinco níveis a partir do solo, para os dias 17/12/2008 e 02/01/2009, às 09:45'00", hora da obtenção das imagens do TM-Landsat 5 para se fazer um comparativo com a temperatura estimada pelo o algoritmo SEBAL. No dia 17/12/2008, a temperatura estimada pelo algoritmo na área foi de 23,5 °C, enquanto a temperatura medida, na mesma hora, na superfície do solo foi de 38,3 °C. Assim, a temperatura do SEBAL foi inferior a temperatura medida, fato que pode ser atribuído a presença de nuvens na área.

Comportamento semelhante foi identificado no dia 02/01/2009: a temperatura estimada pelo SEBAL foi de 19,0 C° e a temperatura medida na superfície, de 40,5 °C. Nesse caso, a diferença de temperatura estimada e medida ainda é maior que a anterior, fato que também pode ser atribuído a presença de nuvens na área. No geral, as temperaturas medidas são elevadas na superfície do solo e, à medida que se afasta da superfície, tendem a diminuir com exceção a 100 cm, altura onde as temperaturas se apresentaram superiores às de 50 cm nos dois dias, o que pode ter sido causado por problemas com o sensor.



**Figura 11** - Temperaturas medidas nos cinco níveis a partir do solo para os dias 17/12/2008 e 02/01/2009 às 09h 45'00'', hora da obtenção das imagens do TM-LANDSAT 5.

### 4.3. Evapotranspiração com balanço hídrico no solo

#### 4.3.1. Determinação da curva de retenção da água no solo

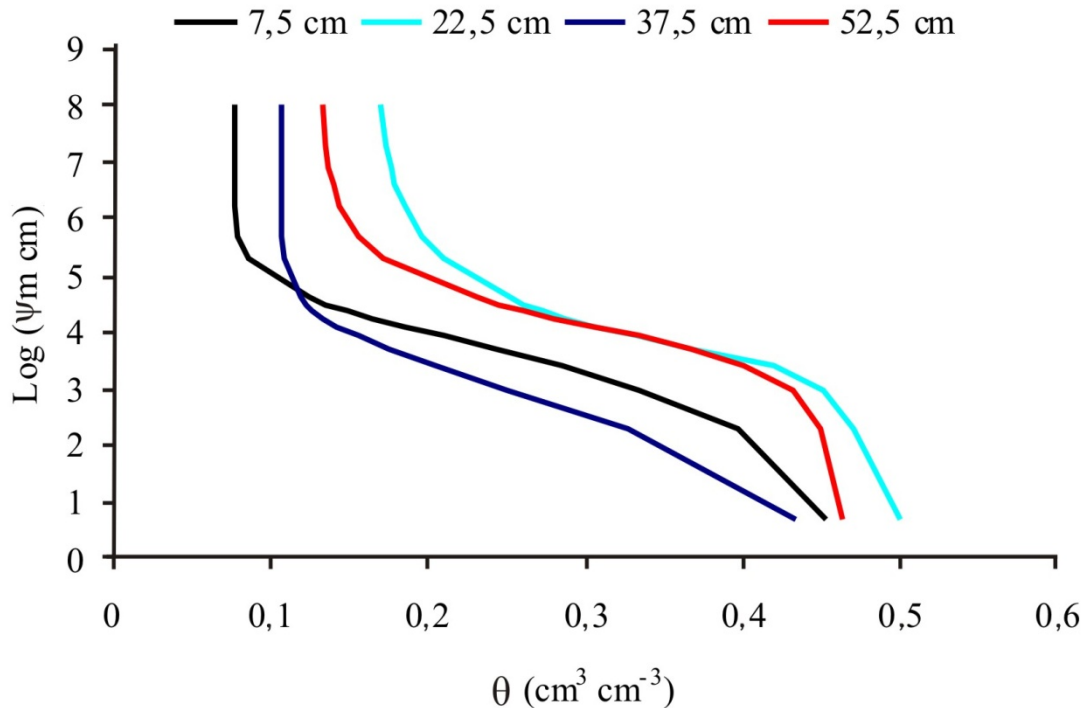
A curva característica de água no solo, ajustada pela equação de van Genuchten, é apresentada na Tabela 2. Considerando que o solo na área é franco arenoso, a umidade de saturação mostrada na Tabela, que varia de 0,45 a 0,49  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  é relativamente alta, já que em um solo franco argilo arenoso SALES (2007) encontrou umidades de saturação para três profundidades variando de 0,43 a 0,44  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

Tabela 02 – Valores dos parâmetros  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\theta_r$ ,  $\theta_s$  da equação de van Genuchten

Prof (cm)	Parâmetros				
	$\theta_r (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\theta_s (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\alpha (\text{kPa}^{-1})$	N	m
7,5	0,078	0,466	0,0045	1,1078	6,129
22,5	0,132	0,492	0,0078	0,6622	2,399
37,5	0,107	0,474	0,0015	0,9116	8,876
52,5	0,133	0,453	0,0216	2,4209	0,589

A partir dos parâmetros da equação mostrados na tabela acima, foram traçadas as curvas características da água no solo, nas profundidades 7,5 cm; 22,5 cm; 37,5 cm e 52,5 cm,

como mostra a Figura 12. Observa-se que a profundidade de 37,5 cm se apresenta como a que retém menos água, a profundidade de 22,5 cm é a que retém mais água e as profundidades 7,5 e 52,5 cm apresentam comportamento intermediário.



**Figura 12** - Curvas características da água nas profundidades 7,5; 22,5; 37,5 e 52,5 cm no solo em que foi plantada a melancia.

#### 4.3.2. Determinação da função $K(\theta)$

As equações 29, 30, 31 e 32, definem a condutividade hidráulica da água no solo para as profundidades 7,5 cm; 22,5 cm; 37,5 cm e 52,5 cm, respectivamente e foram obtidas segundo a metodologia de Hillel et al. (1972).

$$K(\theta) = 0,089e^{28,53\theta} \quad (29)$$

$$K(\theta) = 0,0469e^{48,773\theta} \quad (30)$$

$$K(\theta) = 0,0322e^{26,72\theta} \quad (31)$$

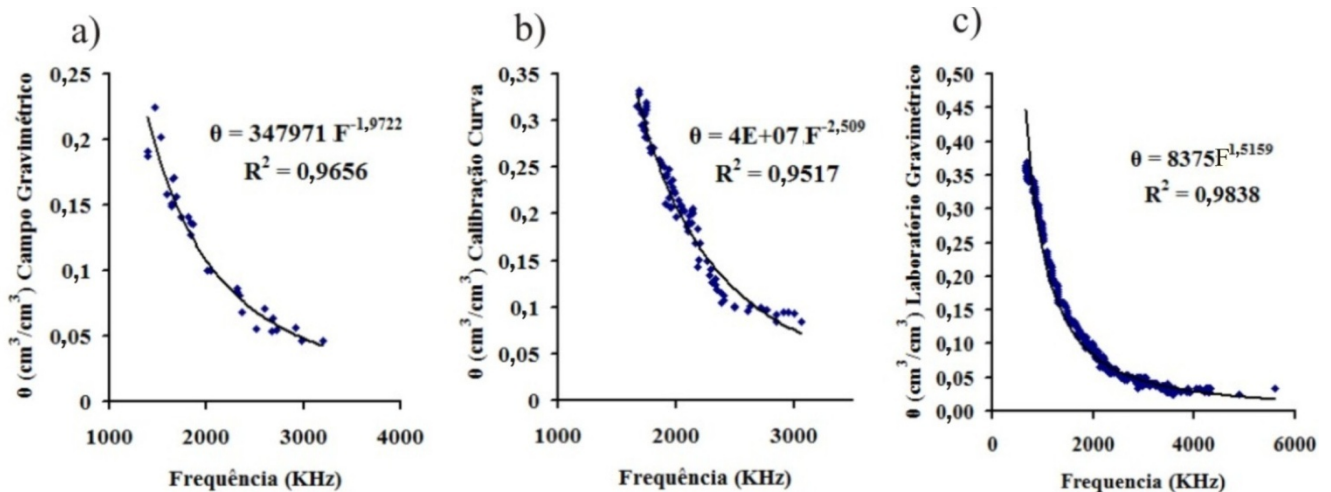
$$K(\theta) = 0,0331e^{26,218\theta} \quad (32)$$

#### 4.3.3. Calibração do sensor capacitivo

Foram feitas três calibrações no sensor obtendo dados em campo para a conversão de frequência (saída do sensor) em umidade volumétrica ( $\theta$ ): calibração em campo, através do

método gravimétrico (Campo Gravimétrico); calibração em laboratório, pelo método gravimétrico (Laboratório Gravimétrico) e com auxílio da curva característica do solo. As calibrações permitiram converter potencial matricial em umidade volumétrica com os parâmetros encontrados para a equação de van Genuchten e, assim, foi feita uma nova calibração comparando essa umidade com a frequência lida pelos sensores na área em que foi feito o experimento do  $K(\theta)$  (Calibração Curva).

Na Figura 13a pode-se observar a calibração campo gravimétrica com  $\theta(\text{cm}^3/\text{cm}^3) = 347971.f(\text{kHz})^{-1,9722}$  e um coeficiente de determinação de 0,9656. A calibração do sensor com o método indireto (calibração com curva) produziu a equação:  $\theta(\text{cm}^3/\text{cm}^3) = 40000000.F(\text{kHz})^{-2,509}$ , tendo um coeficiente de determinação de 0,9517 (Figura 13b). Já com a calibração em laboratório encontrou-se a equação  $\theta(\text{cm}^3/\text{cm}^3) = 8375.F(\text{kHz})^{-1,5159}$  e coeficiente de determinação de 0,9838, mostrado na Figura (13c).

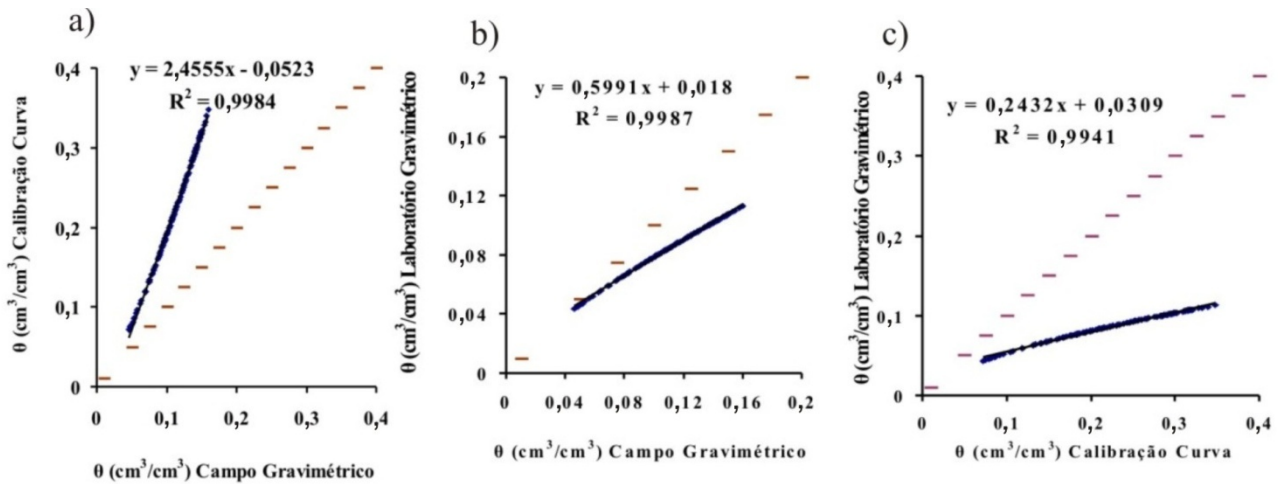


**Figura 13** - Umidade volumétrica em função da frequência a) campo gravimétrico; b) calibração curva; c) laboratório gravimétrico.

Na Figura 14 pode se observar a relação existente entre os métodos de calibração. As equações para o cálculo de umidade com base na frequência lida pelo sensor diferem para os três métodos. Verifica-se que uma maior aproximação nas equações obtidas pelo método Laboratório Gravimétrico e Campo Gravimétrico (Figura 14b) com um coeficiente de determinação de 0,9987 é justificável já que são dois métodos de medida direta de umidade no solo.

Acredita-se que a melhor equação de calibração é a obtida pelo método Campo Gravimétrico já que esse é um método padrão para calibrar outros métodos indiretos como lembram Leão et al. (2007), além de que, com calibração em laboratório há um risco de

alteração da estrutura do solo. A calibração em laboratório começou sob condições de saturação, fato que justifica a superestimação da umidade pela equação.



**Figura 14** – Relação entre as três calibrações do sensor: a) Calibração curva x Campo Gravimétrico; b) Laboratório Gravimétrico x Campo Gravimétrico; c) Laboratório Gravimétrico x Calibração Curva.

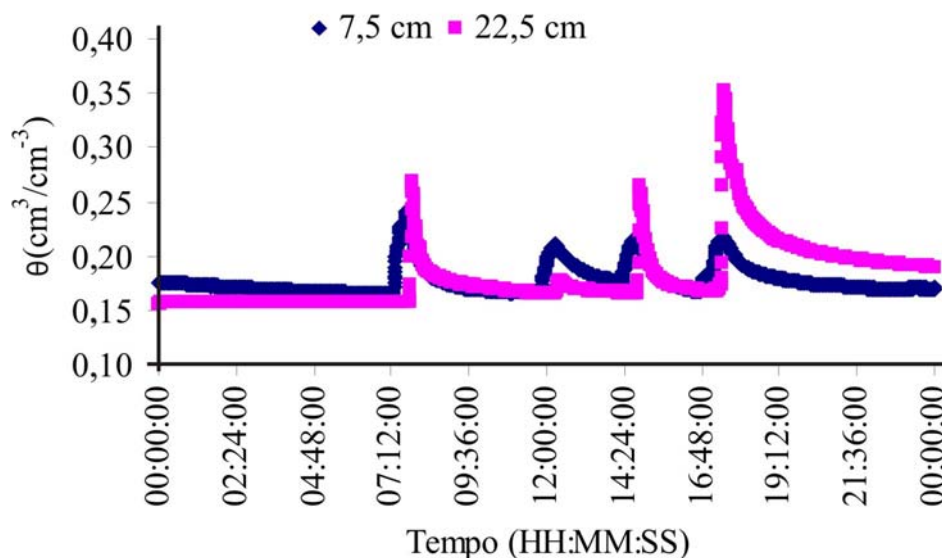
#### 4.3.4. Determinação da Evapotranspiração com Balanço hídrico usando o sensor capacitivo.

O sensor instalado no solo é do tipo capacitivo (detalhes em Silva, 2005); que registra instantaneamente a frequência em kHz. Usando a calibração feita em campo converteu-se frequência em umidade volumétrica do solo. A Figura 15 mostra leituras feitas em sensores instalados à 22,5 e 37,5 cm de profundidade durante um dia. As leituras são feitas a cada 30 segundos, possibilitando assim uma melhor identificação do comportamento da umidade no solo.

Ainda na Figura 15 podem ser identificadas as irrigações feitas na área. O início das irrigações aumenta instantaneamente a umidade do solo, fato caracterizado pelos picos apresentados no gráfico. A camada de solo de 0 a 15 cm (representada pelo sensor a 7,5 cm) recebe água primeiro que a camada de 15 a 30 cm (representada pelo sensor a 22,5 cm), mas a última camada atinge uma umidade volumétrica maior chegando a  $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  enquanto que a primeira camada chega a  $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

Autores como Freitas et al. (1999), Carvalho et al. (2007) estimaram a evapotranspiração na melancia com balanço hídrico usando intervalos de dias para fazê-lo sempre entre uma irrigação e outra. Como nesse trabalho eram feitas mais de uma irrigação por dia, procedeu-se o balanço em intervalos de horas durante o dia entre as irrigações.





**Figura 15** - Umidade do solo monitorada com sensores capacitivos nas profundidades 7,5 e 22,5 cm no dia 17/12/2009.

Na Tabela 03 pode ser observado o balanço hídrico de três dias em que foram monitoradas as umidades do solo usando os sensores capacitivos. O intervalo de tempo em que foi feito o balanço corresponde ao intervalo entre irrigações durante o dia. As irrigações eram pulsos de 20 minutos em um sistema de gotejamento com três gotejadores por planta e vazão de  $1,49 \text{ L h}^{-1}$  por gotejador. A lâmina total aplicada por irrigação foi de 4,2 mm.

Oliveira (2008), em experimento na mesma área, encontrou profundidade efetiva do sistema radicular da melancia de 25 cm. Assim, nesse estudo, o balanço hídrico foi feito na camada de solo de 0 a 30 cm representando bem a profundidade efetiva do sistema radicular. A variação do armazenamento ( $\Delta \text{ARM}$ ) foi calculada utilizando-se a expressão citada por Reichardt (1988) representada pela equação (08), em que a umidade da camada foi considerada como a média das umidades monitoradas pelos sensores instalados a 7,5 cm e 22,5 cm de profundidade.

Para a estimativa da percolação ou ascensão capilar da camada em consideração foi utilizada a equação 05 de Darcy – Buckingham, a condutividade hidráulica do solo não saturado foi obtida pelas equações 29 e 30 (item 4.3.2) e o gradiente de potencial correspondente aos obtidos nas profundidades 22,5 e 37,5 cm. Os potenciais nessas profundidades foram calculados com a umidade do solo monitorada pelos sensores e os parâmetros da equação de van Genuchten mostrados na Tabela 02. No cálculo da evapotranspiração diária da melancia foi considerado o balanço hídrico entre 7:00 e 17:00 h.

Conforme observa-se na Tabela 03, o dia 17/12/2008 apresentou uma média horária de evapotranspiração ( $2,38 \text{ mm h}^{-1}$ ) bastante elevada no intervalo de 14:00 as 16:00 h. Valores horários de evapotranspiração como esse normalmente não acontecem, o que pode ser atribuído a um erro de superestimativa. Considerando que a conversão de frequência em umidade (calibração do sensor) e a conversão de umidade em potencial da água no solo, segundo os parâmetros das equações de van Genuchten produzem erros, a probabilidade do erro final associado ao balanço hídrico é o produto dos dois, fato que justifica a evapotranspiração bastante elevada.

Tabela 03 – Balanço Hídrico no solo em intervalos de irrigações nos dias 17, 18 e 19/12/2009.

Dia	Período (h)	mm					
		I	( $\Delta$ ARM)	Fluxo	Etc	Etc_hora	Etc dia
17/12/2008	07:00 - 11:00	4,2	-0,09	-2,77	2,21	0,55	9,37
	11:00 - 14:00	4,2	1,60	-1,34	1,25	0,41	
	14:00 - 16:00	4,2	-2,61	-2,03	4,77	2,38	
	16:00 - 18:00	4,2	3,46	0,39	1,13	0,28	
18/12/2008	07:30 - 10:30	4,2	0,96	0,81	4,04	1,34	12,18
	10:30 - 14:30	4,2	0,70	0,64	4,14	1,03	
	14:30 - 17:30	4,2	0,77	0,56	3,99	1,33	
19/12/2008	07:00 - 11:00	4,2	1,06	0,37	3,50	0,87	11,27
	11:00 - 14:00	4,2	-0,39	0,69	5,29	1,76	
	14:00 - 17:00	4,2	2,28	0,55	2,47	0,82	

A evapotranspiração diária para os dias analisados foi 9,37; 12,18 e 11,27  $\text{mm dia}^{-1}$  em 17, 18 e 19 de dezembro de 2008, respectivamente. Esses dias correspondem a 47, 48 e 49 dias após plantio, o que, segundo Allen et al. (1998), é a fase fenológica intermediária da melancia com cobertura vegetal superior a 80%, fato também observado nesse trabalho. Essa é a fase de formação e enchimento dos frutos o que justifica a evapotranspiração máxima da cultura.

Miranda et al. (2004) obtiveram coeficientes de cultivo da melancia irrigada por gotejamento, em Paraipaba - CE no período de julho a setembro 1998. Os autores atribuíram um Kc a fase intermediária próximo de 1,4. Valores de ETo (metodologia da FAO-56) nos respectivos dias em que foi feito o balanço hídrico foram 5,5; 5,5 e 6 o que permite inferir que os valores de evapotranspiração deveriam ser próximos de 7,7; 7,7 e 8,4  $\text{mm dia}^{-1}$ .

Bezerra & Oliveira (1999) estimaram a evapotranspiração máxima da melancia irrigada em Fortaleza - CE, no período de outubro a dezembro de 1997, através do balanço hídrico no solo e obtiveram um valor máximo de ETc de 8,7  $\text{mm dia}^{-1}$ , na fase de enchimento dos frutos. Ainda na mesma fase (47 dias após o plantio), Carvalho et al. (2007) obtiveram

ETc de  $7,7 \text{ mm dia}^{-1}$  também estimando evapotranspiração com balanço hídrico na mesma área, no período de setembro a novembro de 2003.

#### **4.4. Balanço de energia na superfície com eddy correlation**

##### **4.4.1. Evolução diária da densidade de fluxo de energia**

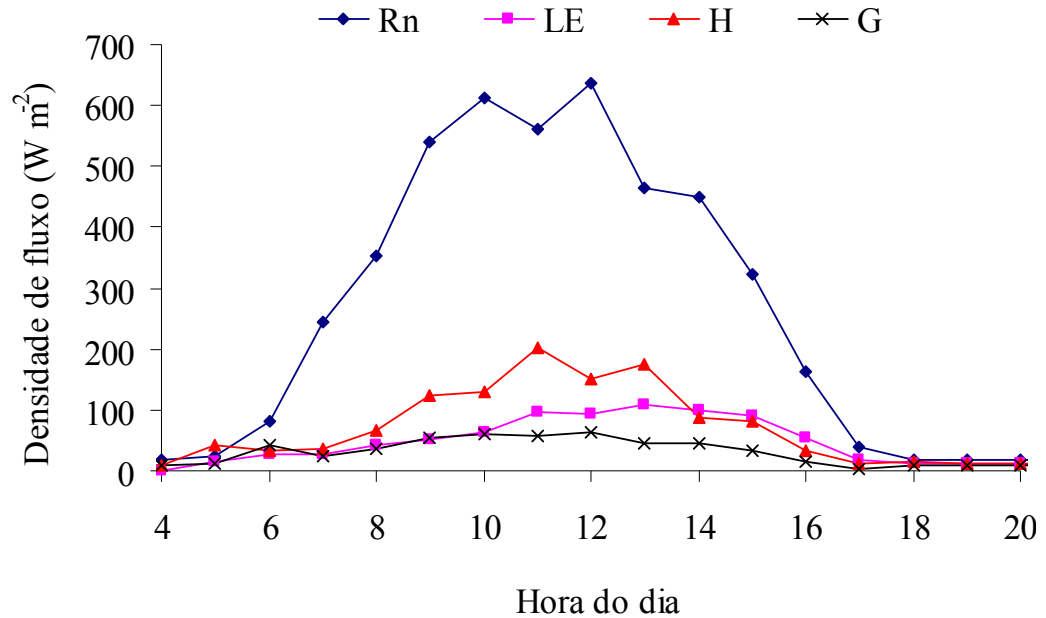
Para determinar os valores de  $R_n$  e  $G$  foi usado a equação 7 (metodologia da FAO-56 de Allen et al. 1998) a partir dos dados de uma estação meteorológica próxima a área de estudo. Os valores de  $LE$  e  $H$  foram obtidos pelo método das correlações turbulentas de uma estação localizada no centro da área em que foi cultivada a melancia.

A variação ao longo do dia dos componentes do balanço de energia é apresentada nas Figuras 16; 17; 18, e 19, correspondentes aos dias 351; 356; 361 e 2, respectivamente, que foram os dias escolhidos entre dezembro de 2008 e janeiro de 2009. Frequentemente, os valores máximos de  $R_n$  foram superiores a  $600 \text{ W m}^{-2}$  e ocorreram, em geral, entre 12:00 e 13:00 h, com exceção do dia 02 (último dia) que teve um  $R_n$  máximo de  $550 \text{ W m}^{-2}$  ocorrendo às 13:00 h. No mesmo intervalo de tempo durante o dia Lima et al. (2005) cultivando feijão caupi em Brejo Paraibano obtiveram  $R_n$  superiores a  $700 \text{ W m}^{-2}$  no mês de março de 2002.

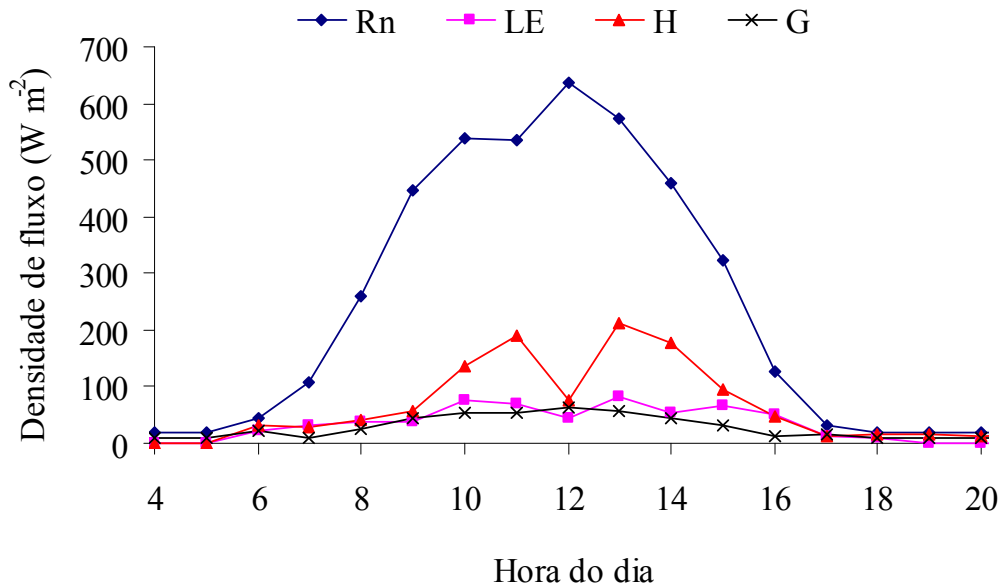
O valor máximo de  $LE$  para o dia 351 (Figura 16) situou-se entre  $90$  e  $110 \text{ W m}^{-2}$ , ocorrido entre 11:00 e 14:00 hs. Para os outros três dias estudados (Figuras 17; 18 e 19) observou-se que os valores máximos de densidade de fluxo de calor latente foram menores, variando entre  $75$  e  $90 \text{ W m}^{-2}$ . Esses valores estão bem abaixo dos obtidos por Arruda et al. (2006) que, estudando uma área de transição de reserva florestal para cerrado, no município de Sinop Mato Grosso, usando o método das correlações turbulentas, obtiveram  $LE$  sempre superiores a  $250 \text{ W m}^{-2}$  no período que vai de 9:00 às 16:00 hs no mês de Agosto de 2002. Já Lima et al. (2005), na fase reprodutiva do feijão caupi, obtiveram  $LE$  sempre superiores a  $300 \text{ W m}^{-2}$  no período de 10:00 às 13:00 hs.

Quanto à densidade de fluxo de calor sensível ( $H$ ), seus valores máximos sempre foram superiores aos do  $LE$ , geralmente estando entre  $130$  e  $230 \text{ W m}^{-2}$ , registrados entre as 9:30 e 14:00 h. No dia 356 (Figura 17) observou-se uma diminuição dos fluxos de calor latente e sensível exatamente às 12 h, fato que pode ser atribuído a presença de nuvens na área.

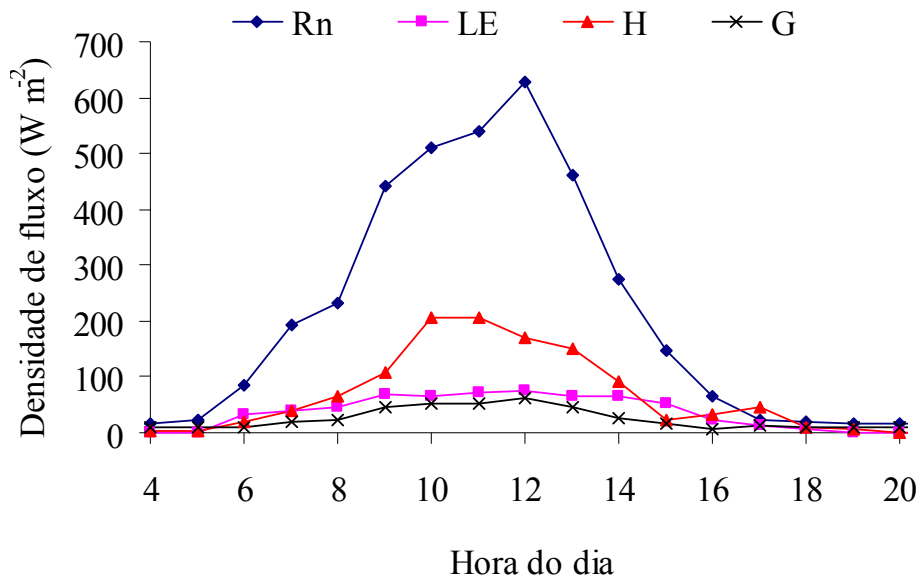
A evolução do fluxo de calor no solo (G) se apresentou de forma semelhante a LE e H, com valores máximos ocorrendo em geral entre 10:00 e 14:00 h, os quais estiveram na faixa de 40 a 65  $W m^{-2}$ .



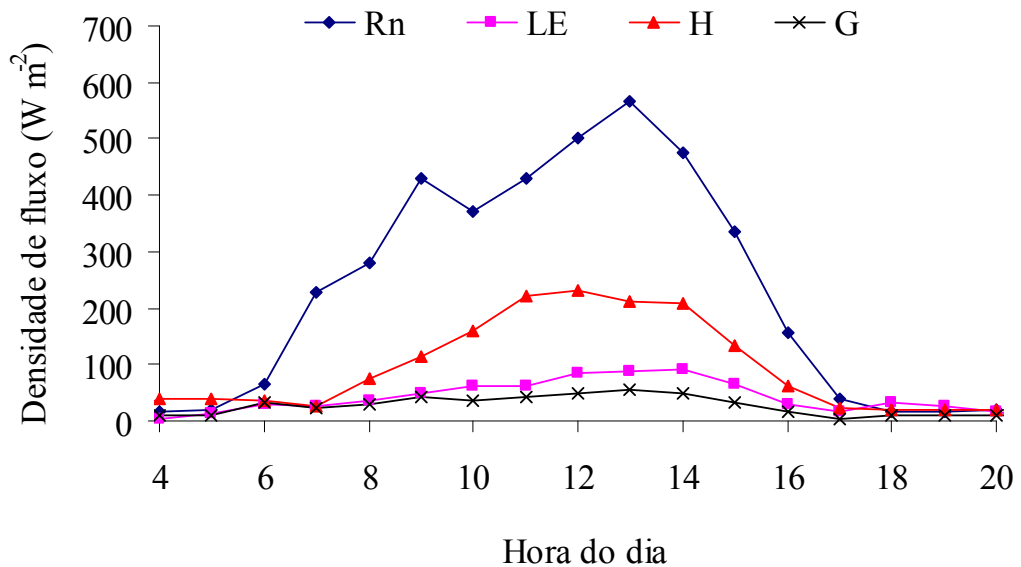
**Figura 16** - Variação ao longo do dia do saldo de radiação, dos fluxos de calor sensível, calor latente e calor no solo para o dia 351 no ano de 2008.



**Figura 17** - Variação ao longo do dia do saldo de radiação, dos fluxos de calor sensível, calor latente e calor no solo para o dia 356 no ano de 2008.



**Figura 18** - Variação ao longo do dia do saldo de radiação, dos fluxos de calor sensível, calor latente e calor no solo para o dia 361 no ano de 2008.



**Figura 19** - Variação ao longo do dia do saldo de radiação, dos fluxos de calor sensível, calor latente e calor no solo para o dia 02 no ano de 2009.

#### 4.4.2. Energia diária acumulada durante parte do experimento

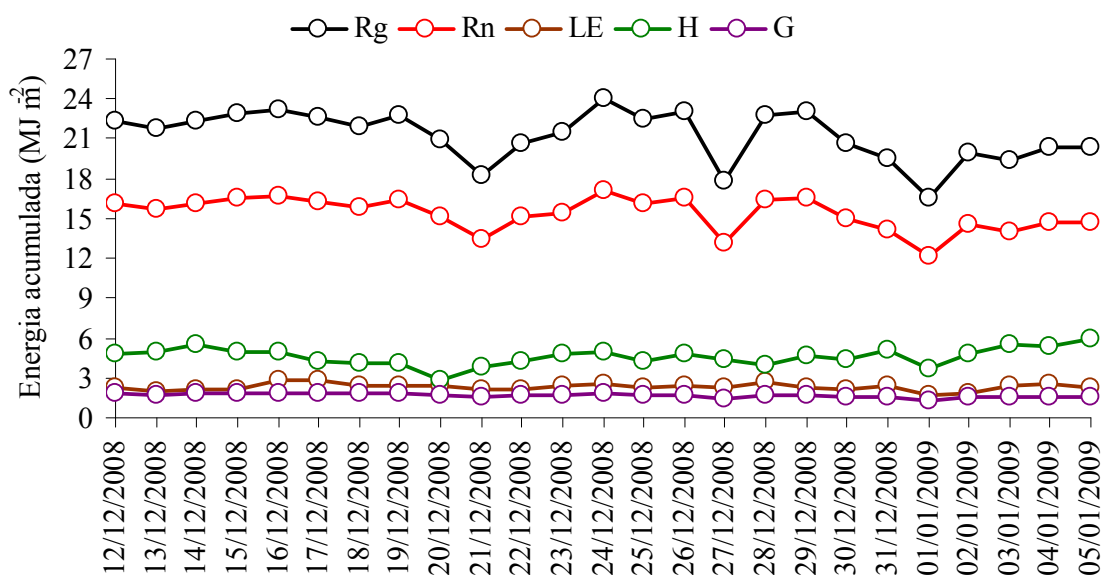
A variação diária dos componentes do balanço de energia e da radiação global sobre a cultura da melancia é apresentada na Figura 20, na qual os totais diários de  $R_g$ ,  $R_n$ ,  $LE$ ,  $H$  e  $G$ , foram integrados utilizando-se os valores do nascer ao pôr-do-sol, ou seja, das 6:00 às 18:00 h do dia 12/12/2008 ao dia 05/01/2009.

Observa-se que as variações do fluxo de calor latente (LE), medido pelo método das correlações turbulentas, seguem as variações do saldo de radiação (Rn) e estas, por sua vez, seguem as variações da radiação global (Rg). Simetria também observada por Lima et al. (2005) ao estudar o balanço de energia em feijão caupi, no município de Areia – PB, nos meses de março a junho de 2002.

O que pode ser observado também é a baixa variabilidade dos dados. Os valores de Rg diários variaram entre 23,96 e 16,48 MJ m<sup>-2</sup> com valor médio de 21,23 ± 1,88 MJ m<sup>-2</sup>, os valores da Rn oscilaram entre 17,12 e 12,15 MJ m<sup>-2</sup> com valor médio de 15,35 ± 1,26 MJ m<sup>-2</sup>, enquanto os valores de LE oscilaram entre 2,85 e 1,68 MJ m<sup>-2</sup>, com valor médio de 2,3 ± 0,27 MJ m<sup>-2</sup>. San José et al. (2003), para as condições das savanas neotropicais da Venezuela, encontraram, para feijão caupi, valores médios do fluxo de calor latente de 8,45 MJ m<sup>-2</sup>, ou seja, valores muito superiores aos encontrados neste trabalho para a melancia, fato que pode ser atribuído aos valores subestimados de LE através do método das correlações turbulentas como comentado por Twine et al. (2000).

Observa-se, ainda, que os valores de H variaram entre 5,87 e 2,84 MJ m<sup>-2</sup> com valor médio de 4,60 ± 0,65 MJ m<sup>-2</sup>. O fluxo de calor sensível (H) apresentou uma tendência crescente dos maiores valores no final do cultivo, ou seja, a partir de 62 DAP onde a irrigação já havia diminuído e a colheita estava sendo feita, tendo assim uma menor área foliar.

O fluxo de calor no solo (G) teve seus valores oscilando entre 1,87 e 1,31 MJ m<sup>-2</sup>, com valor médio de 1,67 ± 0,15 MJ m<sup>-2</sup>.



**Figura 20** - Variação diária da radiação global (Rg), do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G), na cultura da melancia, durante o período de 12/12/2008 a 05/01/2009, na área de estudo.

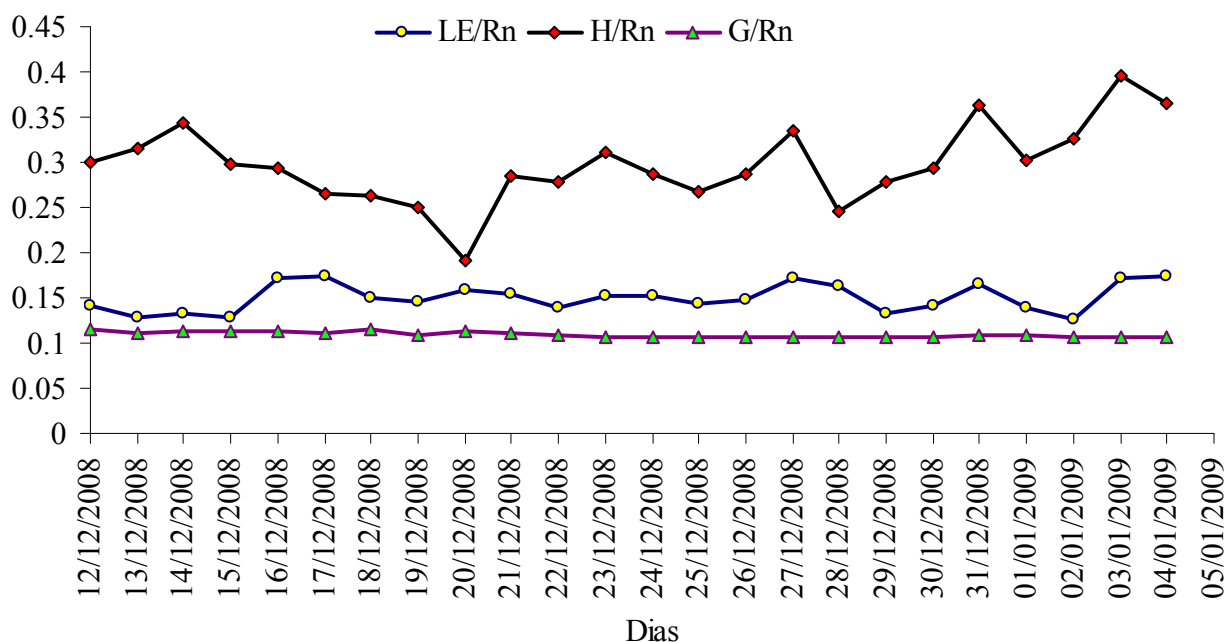
#### 4.4.3. Partição do saldo de radiação entre os componentes do balanço de energia

Na Figura 21 são apresentados os valores da partição do saldo de radiação entre os fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G). Vê-se que a maior porção do saldo de radiação (Rn) foi utilizada como fluxo de calor sensível (H), com valor médio de  $0,30 \pm 0,047$  para o período estudado. Os menores valores (0,19 à 0,29) foram encontrados a partir do dia 16/12/2008, nesta fase, o solo se encontrava com quase 80% de cobertura vegetal (Figura 08).

O valor médio da porção do saldo de radiação utilizada como fluxo de calor latente foi  $0,15 \pm 0,015$ , com os maiores valores (0,15-0,17) a partir do dia 16/12/2008 (46 DAP) em que a cobertura do solo foi superior a 70%. Esses resultados diferiram dos de Lima et al. (2005) que, fazendo o balanço de radiação no feijão caupi nos meses de março a abril de 2002 no município de Areia – PB, encontraram a relação LE/Rn 0,71. A baixa densidade de fluxo de calor latente medida pelo método das correlações turbulentas foi responsável pela pequena participação do LE na radiação líquida nesse trabalho.

A porção do saldo de radiação (Rn) utilizada para o fluxo de calor no solo (G), teve valor médio de  $0,10 \pm 0,002$ , com maiores valores encontrados nos primeiros dias de avaliação.

Teixeira (2001), ao avaliar a fração do saldo de radiação utilizada como fluxo de calor latente, sensível e no solo, durante o primeiro ciclo de cultura da banana cv. Pacovan, em Petrolina-CE, obteve valores entre 0,82 e 0,93 para LE/Rn, 0,04 e 0,01 para H/Rn e 0,14 e 0,06 para G/Rn. A comparação entre os resultados mais uma vez destaca grande diferença na relação LE/Rn e H/Rn. Tal diferença pode estar associada ao maior fluxo de calor sensível na área da melancia e, também, ao tamanho e uniformidade da área que pode ter comprometido o uso do método das correlações turbulentas para medir LE.



**Figura 21** - Evolução das razões LE/Rn, H/Rn e G/Rn diárias para parte dos dias do período experimental.

#### 4.4.4 Fechamento do balanço de energia

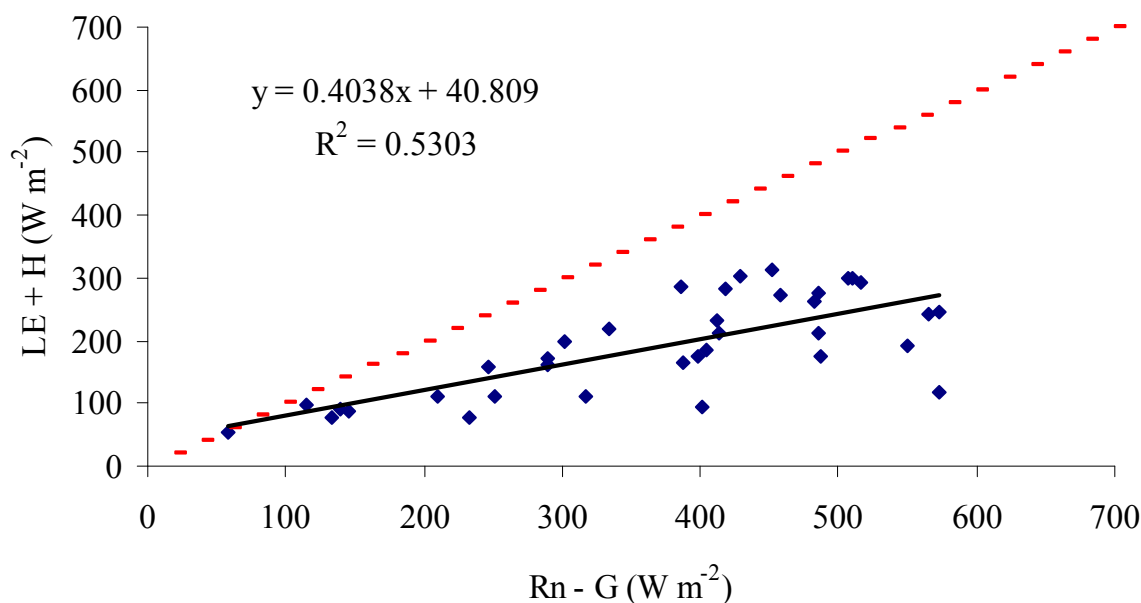
O fechamento da equação do balanço de energia horário na superfície da área de melancia (Figura 22) foi conferido comparando-se o fluxo de calor latente (LE) e o fluxo de calor sensível (H), medidos pelo método das correlações turbulentas com o saldo de radiação (Rn) e o fluxo de calor no solo (G) estimado segundo a metodologia da FAO-56 (Allen et al., 1998).

O fechamento do balanço de energia, definido como sendo a razão entre  $(H+LE)$  e  $(Rn - G)$ , foi avaliado para os dias 351, 356, 361 e 2, (entre Dezembro de 2008 e Janeiro de 2009). Para esse fechamento considerou-se os dados registrados entre 8:00 e 16:00 h.

Em geral, a energia disponível  $(Rn - G)$  excede a soma dos fluxos  $(H+LE)$  medidos pelo método das correlações turbulentas. Certamente essa diferença está associada à subestimativa da LE medida. Fato similar foi observado por Twine et al. (2000), Wilson et al. (2002) e COSTA (2007).

Observou-se que o fechamento mostrou-se pouco preciso através dos dois métodos, já que o coeficiente angular apresentado (0,40) equivale a um erro de cerca de 60%, com coeficiente de determinação de 0,53.





**Figura 22** - Fechamento da equação do balanço de energia da superfície para os dias 351, 356, 361 e 2 entre Dezembro de 2008 e Janeiro de 2009.

#### 4.4.5 Evapotranspiração pelo método das correlações turbulentas

Nas Figuras 23 a 26 são apresentados os resultados horários de evapotranspiração obtidos a partir da densidade média horária do fluxo de calor latente (LE) medido pelo método das correlações turbulentas e evapotranspiração de referência obtido segundo a metodologia da FAO-56 (Allen et al., 1998) para os dias (DJ) 351, 356, 361 do ano de 2008 e 02 do ano de 2009, respectivamente.

O valor máximo horário registrado de ETc foi de 0,1603 mm h<sup>-1</sup>, notificado no dia 351 (Figura 23) às 14 horas. Os valores de evapotranspiração foram mais elevados no período de 7:00 às 17:00 horas em todos os dias analisados.

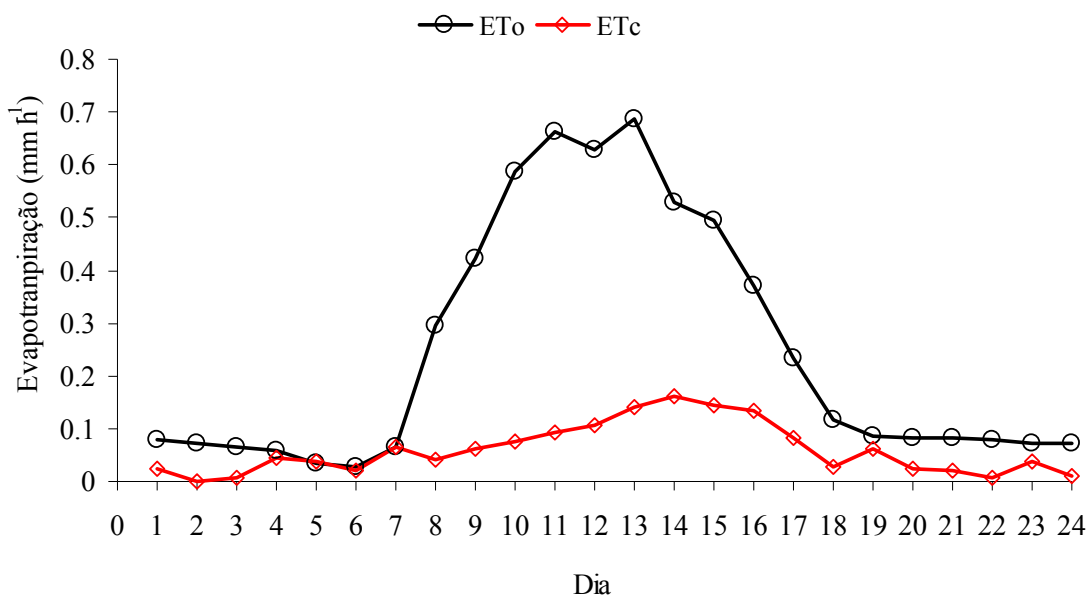
Pode-se ainda observar que os valores máximos nos quatro dias estão entre 12:00 e 13:00 h. A evapotranspiração da cultura, obtida através das correlações turbulentas, não tem o formato da curva de Gauss e seus valores mais elevados de evapotranspiração horária se encontram entre 13:00 e 15:00 h.

Sob condições parecidas de clima em melancia irrigada por gotejamento, usando o lisímetro de pesagem, Miranda et al. (2004) obtiveram uma ETc média de 7,5 mm dia<sup>-1</sup> e um Kc que apresentou valores próximo ou superiores a 1 a partir de 40 DAP (Fase Intermediária)

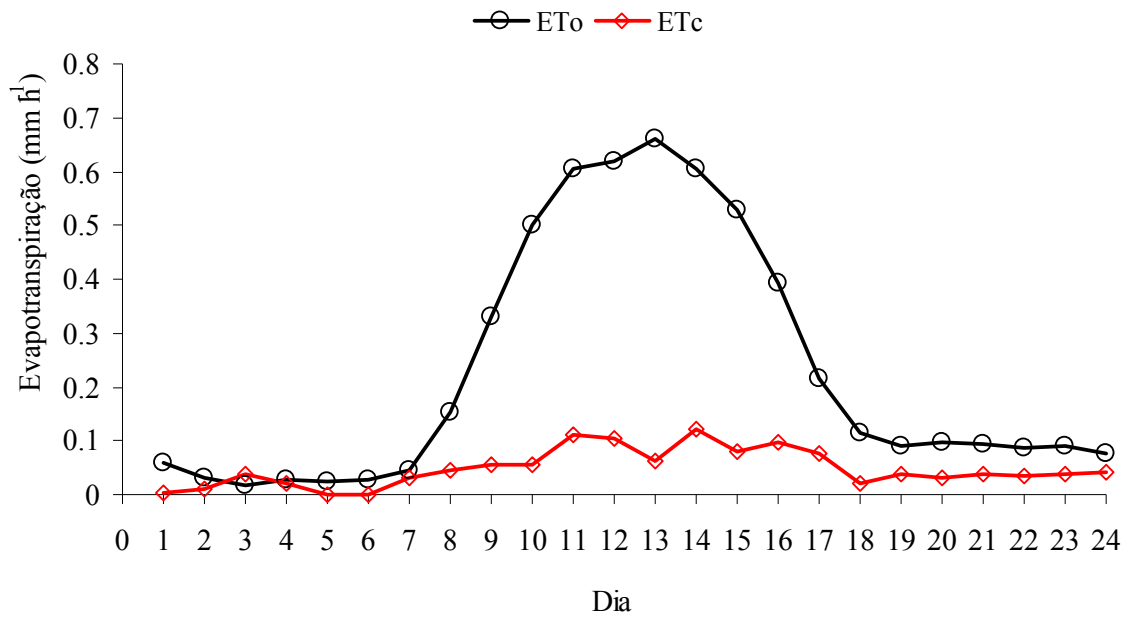
o que significa uma evapotranspiração real semelhante a evapotranspiração de referência, fato não observado nas Figuras 23 (47 DAP), 24 (52 DAP), 25 (57 DAP) e 26 (63 DAP).

A evapotranspiração média horária, no período de 11 às 14 hs do dia 17/12/2008 (47 DAP), usando o balanço hídrico no solo feito com o sensor capacitivo, foi  $0,411 \text{ mm h}^{-1}$ . Ainda no mesmo período observou-se que a  $ET_c$  média, usando o método das correlações turbulentas, foi de  $0,1251 \text{ mm h}^{-1}$ , valor bem inferior ao encontrado pelo balanço hídrico no solo.

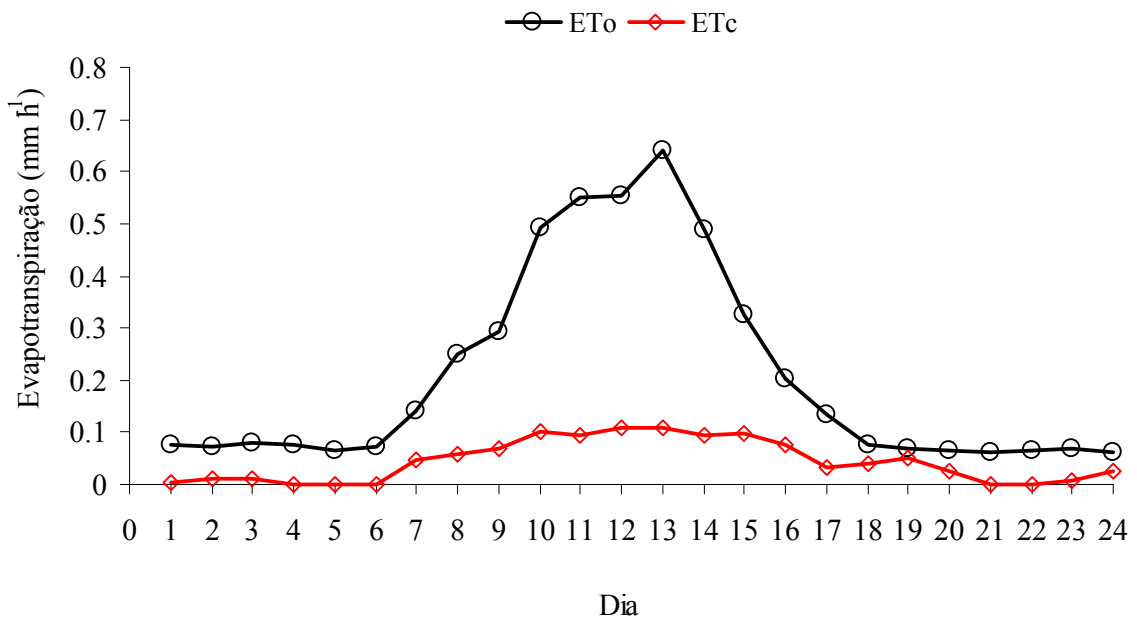
Essa grande diferença entre a  $ET_c$  pelo método das correlações turbulentas e a  $ET_o$  é devida aos valores subestimados do fluxo de calor latente observados em menores proporções por Twine et al. (2000), Wilson et al. (2002) e Costa (2007). As maiores diferenças encontradas nesse trabalho podem estar associados ao pequeno tamanho da área e a não uniformidade da superfície de cobertura do solo pela melancia, fatores de bastante importância no uso desse método.



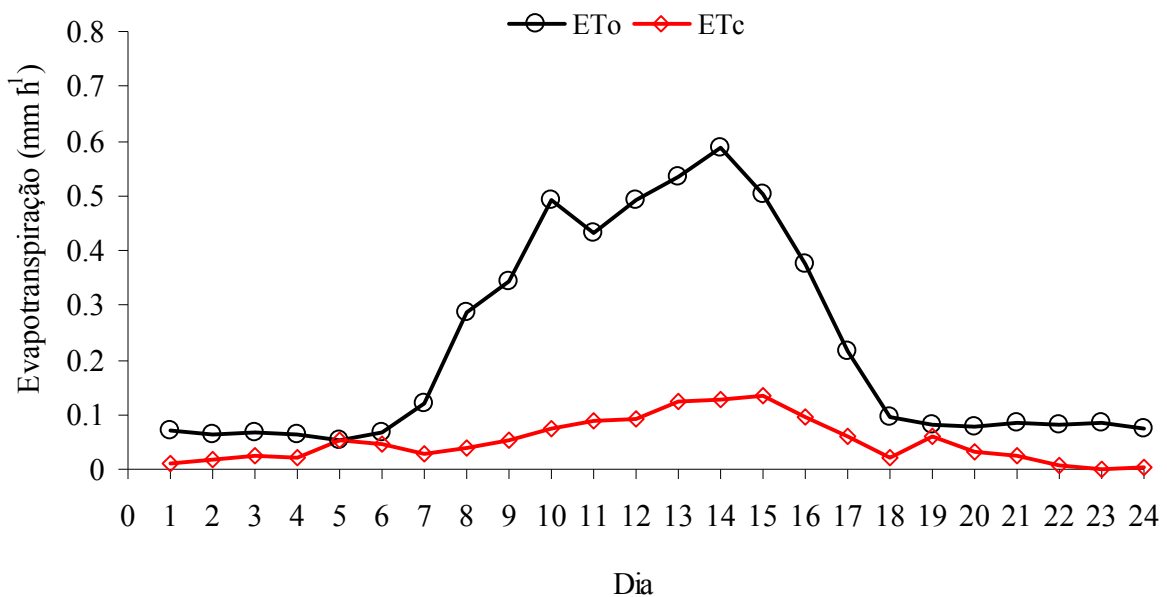
**Figura 23** - Evolução ao longo do dia da  $ET_o$  (metodologia da FAO-56) e  $ET_c$  (correlações turbulentas) para o dia 351 no ano de 2008.



**Figura 24** - Evolução ao longo do dia da ETo (metodologia da FAO-56) e ETc (correlações turbulentas) para o dia 356 no ano de 2008.



**Figura 25** - Evolução ao longo do dia da ETo (metodologia da FAO-56) e ETc (correlações turbulentas) para o dia 361 no ano de 2008.

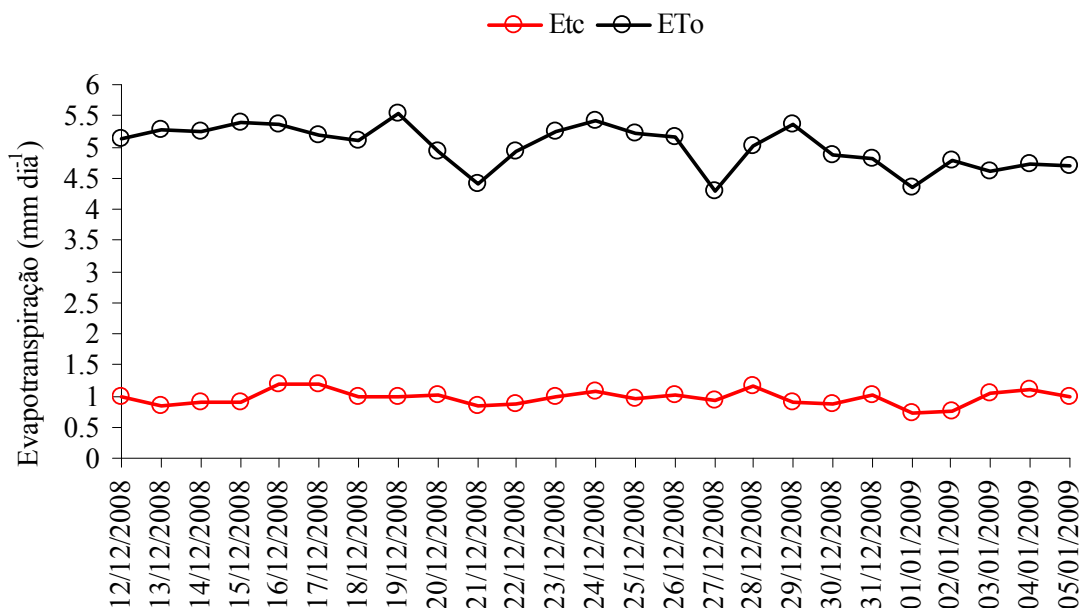


**Figura 26** - Evolução ao longo do dia da ETo (metodologia da FAO-56) e ETc (método das correlações turbulentas) para o dia 02 no ano de 2009.

Na Figura 27 observa-se a evapotranspiração real (correlações turbulentas) e a evapotranspiração de referência diária (metodologia da FAO-56) durante parte do cultivo da melancia (42 à 65 DAP). O valor máximo de ETo foi de 5,53 mm dia<sup>-1</sup> no dia 19/12/2009 e o máximo de ETc foi 1,18 mm dia<sup>-1</sup> no dia 16/12/2008. Os valores médios para ETo e ETc foram 4,99 e 0,96 mm dia<sup>-1</sup> com um desvio de 0,35 e 0,12 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Observa-se que apesar da ETc aumentar durante o ciclo, sua variabilidade foi muito pequena.

Costa (2007) usou a mesma metodologia na cultura da bananeira, no município de Quixeré CE, obtendo uma ETo média de 5 mm dia<sup>-1</sup> e observou um aumento acentuado na ETc durante o ciclo da cultura, obtendo uma ETc média se aproximando de 3 mm dia<sup>-1</sup>. A autora usou dados de 1 ano de coleta, enquanto que os dados da melancia são de apenas 25 dias, dificultando assim observar um acréscimo acentuado da ETc.

A partir do dia 16/12/2008 (46 DAP) observou-se um pequeno aumento na evapotranspiração mediada (ETc), fato que pode estar associado ao aumento da evapotranspiração de referencial ou ao período em que a melancia apresentava cobertura foliar próxima ao máximo, além de ser a época de formação dos frutos.



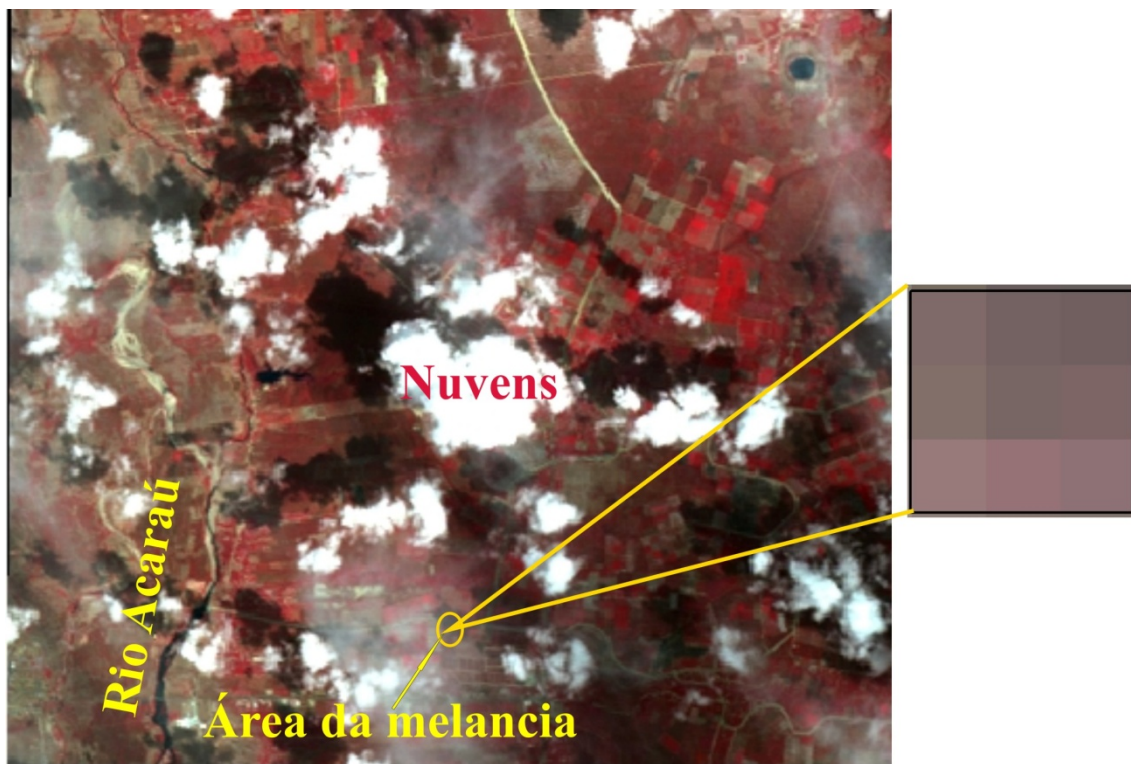
**Figura 27** - Evolução diária da ETo (metodologia da FAO-56) e Etc (método das correlações turbulentas) durante 25 dias na melancia, de 12/12/2008 a 05/01/2009.

## 4.5 SEBAL

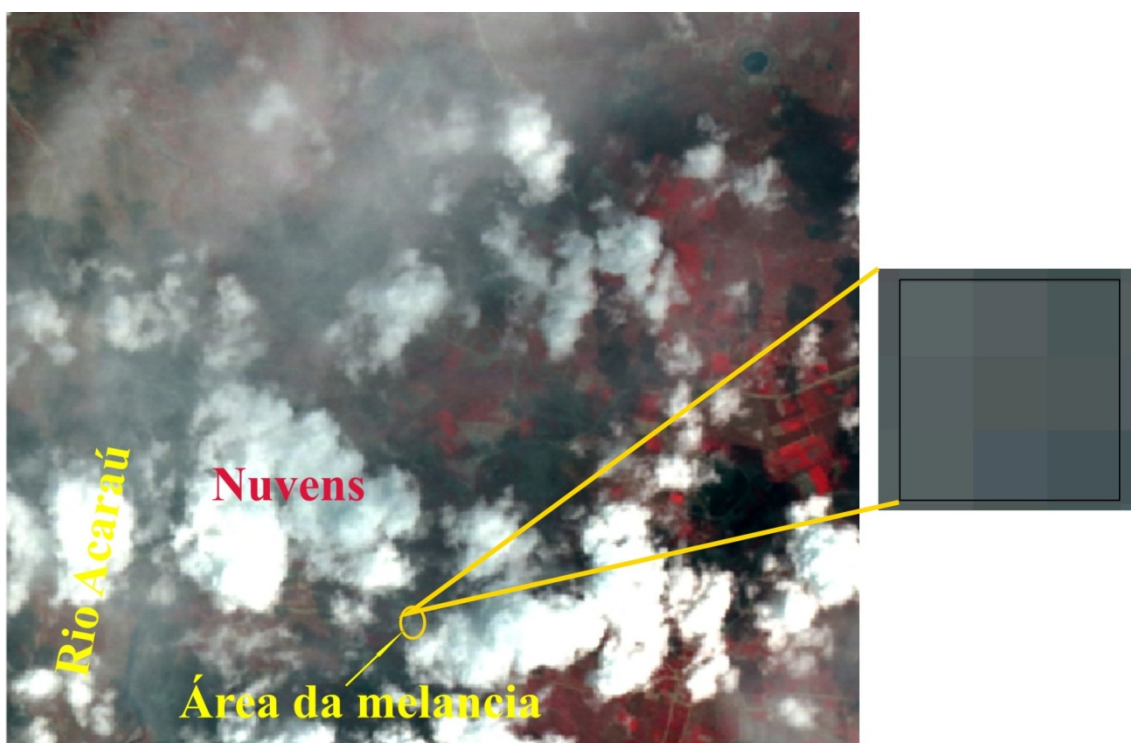
### 4.5.1 Elementos constituintes da região estudada

As Figuras 28 e 29 mostram a imagem da região em estudo nos dias 17/12/2008 e 02/01/2009, respectivamente. Essas imagens são composições em RGB formado pelas bandas 2, 3 e 4 do sensor TM do satélite LANDSAT 5. As formações esbranquiçadas que vão desde o branco transparente ao branco extremo, são nuvens presentes na região no momento de obtenção da imagem. Como pode-se observar, a imagem do dia 17/12/2008 apresenta muitas nuvens, embora em menor quantidade que as do dia 02/01/2009. As áreas cobertas por água apresentam coloração que vão do preto ao azul escuro, como pode ser identificado no rio Acaraú, destacando também a sinuosidade do rio. As áreas de coloração preta, próximas às nuvens são suas sombras e geralmente estão em maiores tamanhos.

Os polígonos formados pelo vermelho intenso, observados nas duas imagens, são lotes irrigados do Perímetro de Irrigação do Baixo Acaraú. A área do experimento é apresentada como destaque com uma amplificação dos nove pixels (corresponde aproximadamente a 1 ha) nas Figuras 28 e 29. Observa-se que a área amplificada no dia 17/12/2008 apresenta tons de vermelho caracterizando a melancia irrigada, diferente da área de 02/02/2009 que tem uma coloração cinza esbranquiçada devido à forte presença de nuvens.



**Figura 28** – Região do Baixo Acaraú em composição RGB no dia 17/12/2008.



**Figura 29** – Região do Baixo Acaraú em composição RGB no dia 02/01/2009

#### 4.5.2 Mapas Temáticos da Radiação Líquida (Rn)

Considerando-se que a extração de informações acerca da superfície terrestre mediante uso de imagens de satélite somente é possível na ausência de nuvens, ou seja, em condições de céu limpo, os valores de Rn obtidos no momento da passagem do satélite representam instantes de maior disponibilidade de energia aos diversos processos biofísicos.

Comparando visualmente as Figuras 30 e 31 dos dois dias estudados, observa-se claramente que existe um mesmo padrão de radiação líquida. Nos dois mapas temáticos os valores de Rn menores que  $270 \text{ W m}^{-2}$ , representado pela cor vermelha, estão no topo das nuvens mais densas caracterizadas como branco extremo na composição RGB das imagens. O albedo dessas áreas varia entre 55 e 71%, corroborando com Moreira (2007) que encontrou um albedo em nuvens na região da chapada do Araripe-Ceará entre 43 e 95%.

As áreas situadas às margens do Rio Acaraú e outras áreas de solo exposto onde não existe coberturas de nuvens na imagem apresentaram Rn variando entre  $270$  a  $370 \text{ W m}^{-2}$ , tendo um albedo próximo a 30% e uma temperatura da superfície variando de  $40$  a  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ , podendo ser melhor identificadas no mapa temático do dia 17/12/2008 (Figura 30). Os valores de Rn para essas áreas são inferiores aos obtidos por Moreira (2007) na mesma região. Silva e Bezerra (2006), para áreas com características similares no município de Petrolina- PE, obtiveram um Rn médio próximos a  $500 \text{ W m}^{-2}$ .

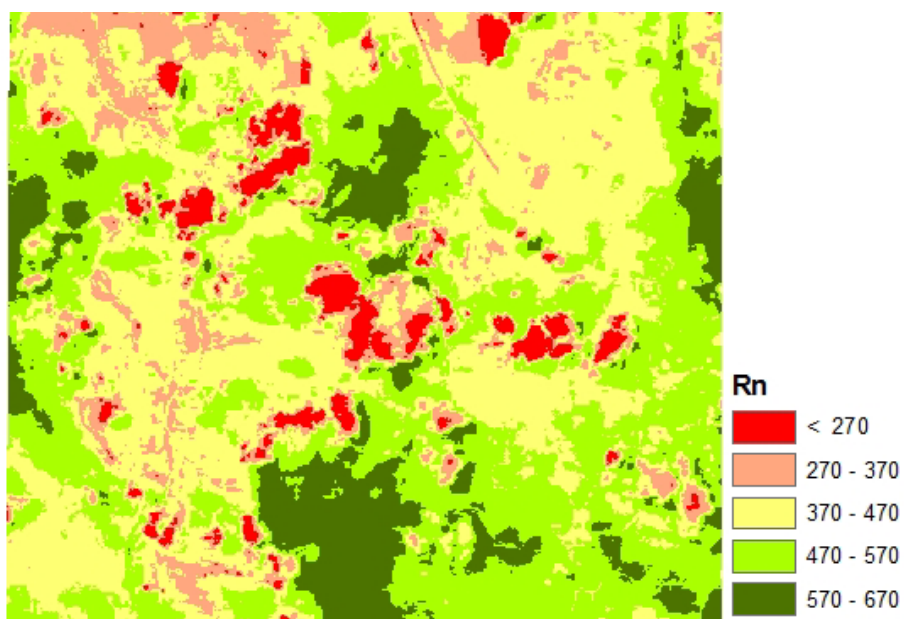
As regiões no mapa que têm Rn variando de  $370$  a  $470 \text{ W m}^{-2}$  são áreas que, em sua maioria, apresentam vegetação nativa, o que pode ser identificado em áreas que não têm nuvens no dia 17/12/2008 (Figura 30). No mapa temático do dia 02/01/2009 (Figura 31), as áreas com essa faixa de Rn são áreas com presença de nuvens, portanto, não podem ser caracterizadas como vegetação nativa.

Grande parte dos lotes irrigados do Perímetro de Irrigação do Baixo Acaraú que não tem cobertura de nuvens nas imagens tiveram uma Rn variando de  $370$  a  $470 \text{ W m}^{-2}$ , essas áreas apresentaram um NDVI superiores a 0,40 nos mapas temáticos das duas datas. Silva et al. (2005) obtiveram Rn em áreas irrigadas próximas ao Rio São Francisco de  $630 \text{ W m}^{-2}$ . Durand et al. (2007), usando imagens do Landsat 7 de 1999 em áreas de pivôs centrais onde eram cultivadas culturas anuais na chapada do Apodi-Ce obtiveram Rn variando de  $550$  a  $605 \text{ W m}^{-2}$ .

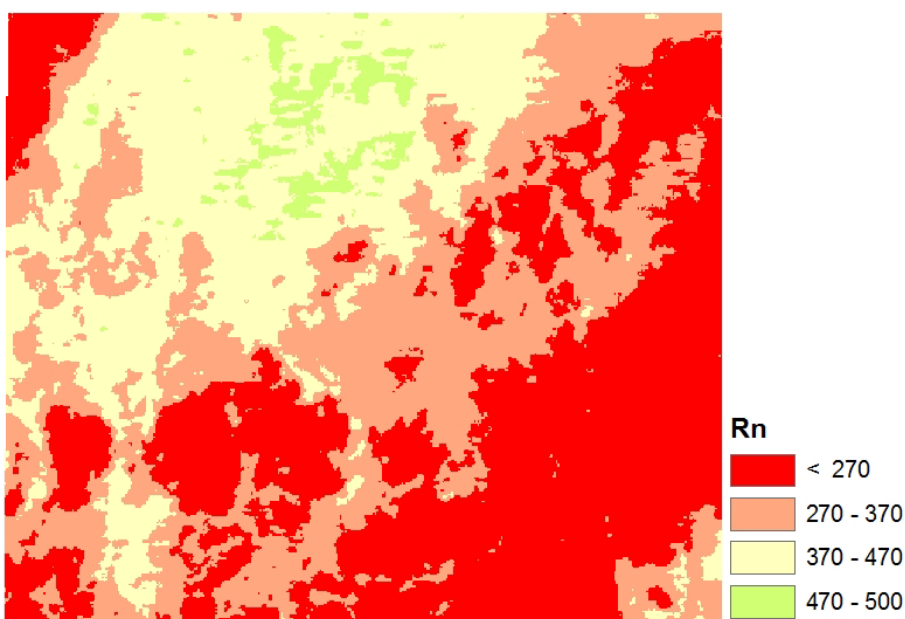
Grande parte da área apresentou Rn superior a  $470 \text{ W m}^{-2}$ , representado pelas cores verde claro ( $470$  a  $570 \text{ W m}^{-2}$ ) e verde escuro ( $570$  a  $670 \text{ W m}^{-2}$ ) nos mapas temáticos. Essas são áreas que têm cobertura de nuvens de baixa densidade, caracterizadas, na composição



RGB, como branco transparente. Apesar de serem nuvens, apresentam o albedo baixo, variando de 5 a 30%, fato que explica um maior Rn e corrobora com Gomes (2009). A área do experimento da melancia no dia 17/12/2008 apresentou um Rn médio de  $570 \text{ W m}^{-2}$  e no dia 02/01/2009 o Rn foi de  $340 \text{ W m}^{-2}$  devido possivelmente a forte presença de nuvens no último dia como pode ser observado na Figura 29.



**Figura 30** - Imagem Temática de Radiação Líquida ( $\text{W m}^{-2}$ ) no dia 17/12/2008 no Baixo Acaraú.



**Figura 31** - Imagem Temática de Radiação Líquida ( $\text{W m}^{-2}$ ) no dia 02/01/2009 no Baixo Acaraú.



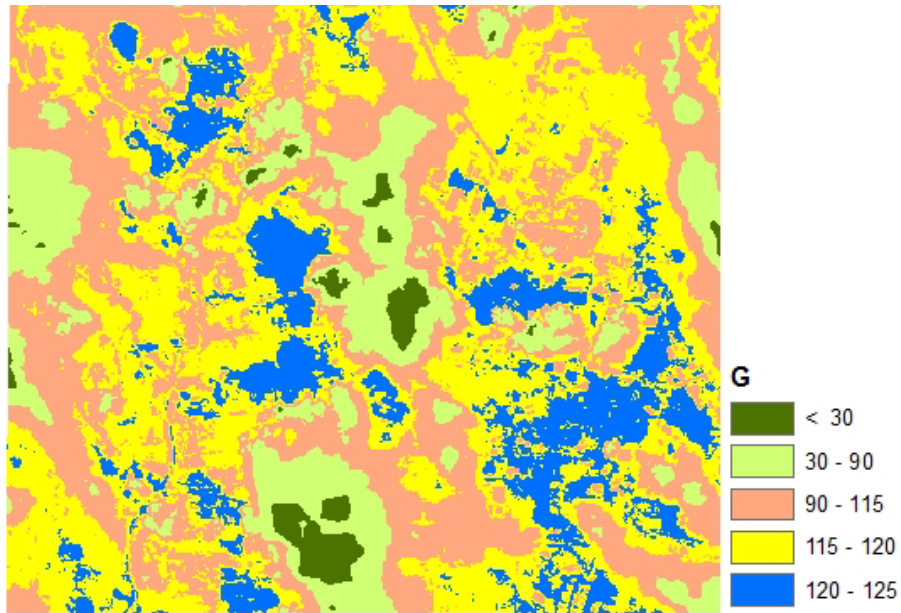
### 4.5.3 Mapas Temáticos do Fluxo de Calor no Solo (G)

Uma vez elaborados os mapas de  $R_n$  e com os valores de NDVI,  $T_s$  e albedo foram obtidos os mapas temáticos do fluxo de calor no solo - G. Segundo Bastiaanssen et al. (1998) e Feitosa (2005), dos componentes do Balanço de Energia o fluxo de calor no solo (G) é o que apresenta maior dificuldade do ponto de vista de precisão, quando estimado por técnicas de sensoriamento remoto. Por outro lado, os últimos autores citados não consideram o fato como um fator limitante ao se trabalhar com áreas pequenas, nas quais minimizam as influências da variação do tipo de solo e da cobertura vegetativa, incompatível com o tamanho do pixel do sensor TM, mesmo sendo de 30 m x 30 m.

Nas Figuras 32 e 33 observam-se os mapas temáticos da densidade de fluxo de calor no solo nas datas estudadas. As regiões com valores abaixo de  $90 \text{ W m}^{-2}$ , representadas pelas cores verde escuro e verde claro, são áreas com presença de nuvens onde o albedo é elevado e o NDVI é inferior a 0,05. Isso pode ser comprovado ao se observar a imagem temática de G no dia 02/01/2009 que se apresenta quase totalmente coberta por nuvens e as regiões com G máximo foram inferiores a  $90 \text{ W m}^{-2}$ .

Nas áreas irrigadas, os fluxos de calor no solo foram próximos a  $90 \text{ W m}^{-2}$ , corroborando com os resultados obtidos por Silva e Bezerra (2006) e Folhes (2007). Na área da melancia o G no dia 17/12/2008 foi de  $54 \text{ W m}^{-2}$  e no dia 02/01/2009 foi de  $14 \text{ W m}^{-2}$ , essa diferença está atribuída a uma maior radiação líquida no primeiro dia.

As regiões com G variando de 90 a  $120 \text{ W m}^{-2}$ , representadas pelas cores roxo e amarelo no mapa temático do dia 17/12/2008 (Figura 32) são áreas de solo descoberto e áreas com vegetação nativa. As regiões do mesmo mapa com G variando entre 120 e  $125 \text{ W m}^{-2}$  de cor azul são as sombra das nuvens que têm a mesma resposta espectral da água.



**Figura 32** - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Solo ( $W m^{-2}$ ) no dia 17/12/2008 no Baixo Acaraú.



**Figura 33** - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Solo ( $W m^{-2}$ ) no dia 02/01/2009 no Baixo Acaraú.

#### 4.5.4 Mapas Temáticos do Fluxo de Calor Sensível (H)

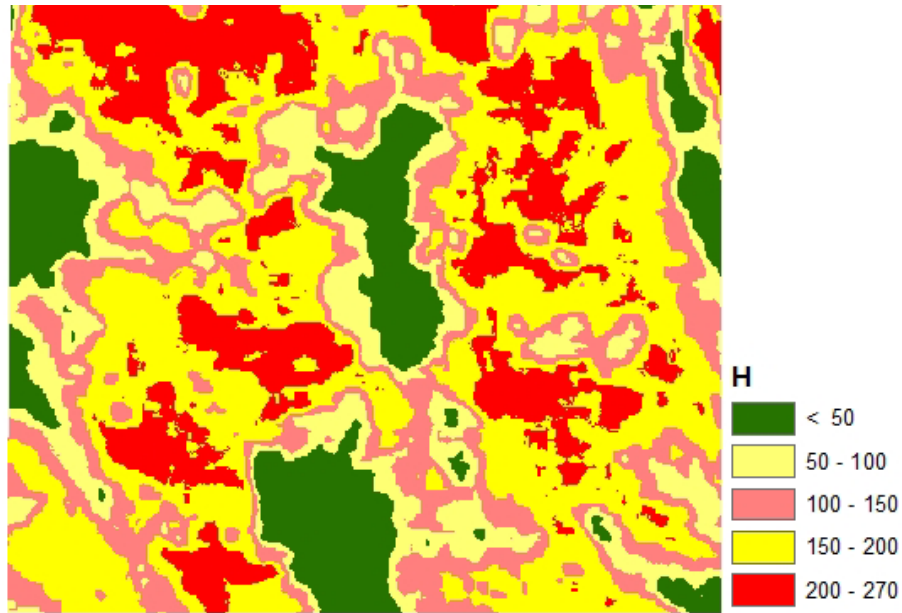
O calor Sensível – H, definido como a quantidade de energia transferida na atmosfera pelos processos de convecção e condução, devido à diferença de temperatura entre a

superfície e o ar próximo desta, pode ser calculado em função do gradiente de temperatura entre dois níveis de referência e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor. Esses dois parâmetros são estimados, para toda a cena estudada, utilizando-se dois pixels de referência, denominados pixels âncoras e a velocidade do vento a determinada altura em um ponto pertencente à área de interesse.

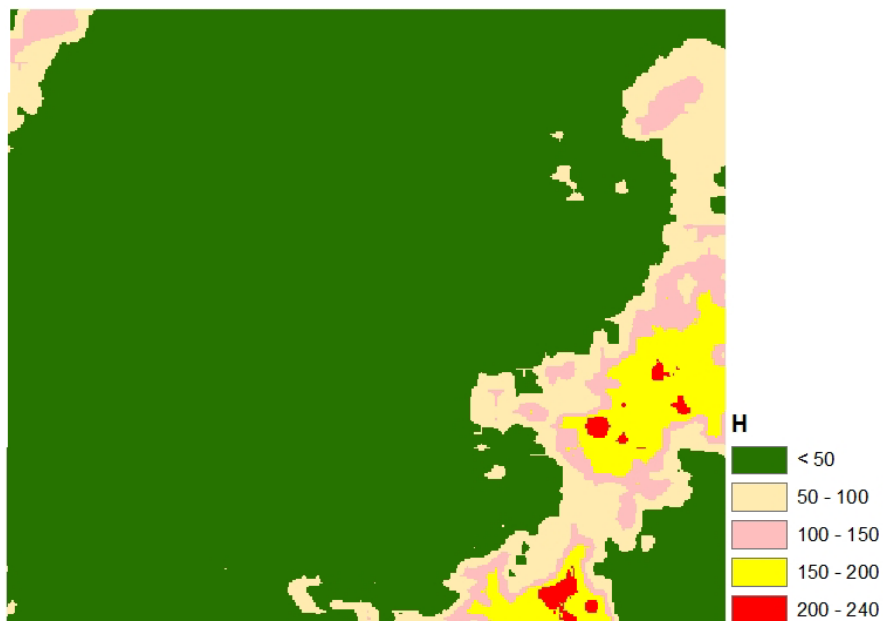
No algoritmo SEBAL, o H é determinado usando o mapa temático do SAVI e da temperatura do solo como parâmetro de entrada em um processo iterativo. Como nas duas imagens havia nuvens, a estimativa da temperatura pelo SEBAL ficou comprometida, conseqüentemente o H também ficaria comprometido nessas regiões. Assim, os dois pixels âncoras foram escolhidos de área sem nuvens na busca de uma melhor determinação do H nessas regiões.

Nas Figuras 34 e 35, são representados os mapas temáticos com os valores instantâneos de H. Nessas Figuras, os valores de H menores que  $50 \text{ W m}^{-2}$  estão representados pela coloração verde e são representativos de nuvens e corpos de água, mas também de áreas em que a temperatura do solo é menor que aquela do pixel âncora frio (SILVA e BEZERRA, 2006). Nota-se que valores entre 50 e  $150 \text{ W m}^{-2}$  concentram-se predominantemente próximos às regiões com nuvens, o que, em uma verificação mais detalhada na composição RGB das imagens, conduz a conclusão de que estas são nuvens de baixa densidade.

As áreas com característica de vegetação nativa sem presença de nuvens tiveram um H variando entre 100 e  $150 \text{ W m}^{-2}$ , dentro dessa faixa também estão as áreas irrigadas. Nas regiões de solo exposto o H foi superior a  $200 \text{ W m}^{-2}$ , esses valores corroboram com Silva e Bezerra (2006), para áreas de mesma característica em alguns pontos na região dos sertões do Estado de Pernambuco.



**Figura 34** - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Sensível ( $W m^{-2}$ ) no dia 17/12/2008 no Baixo Acaraú.



**Figura 35** - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Sensível ( $W m^{-2}$ ) no dia 02/01/2009 no Baixo Acaraú.

#### 4.5.5 Mapas Temáticos do Fluxo de calor Latente (LE)

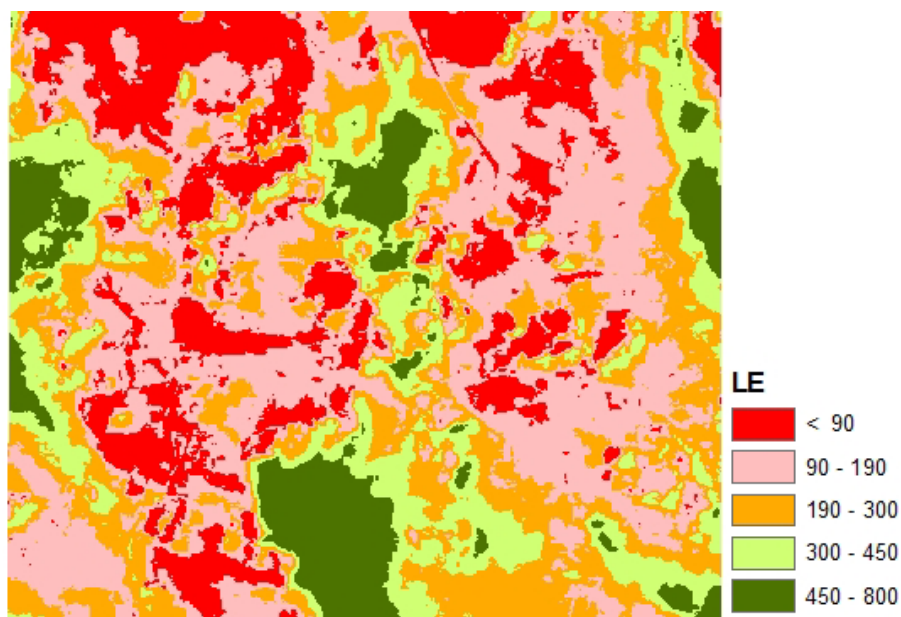
Na metodologia adotada nesta pesquisa, o fluxo de calor latente - LE foi calculado como um termo residual do balanço de energia, conforme sugerido por Bastiaanssen (1995).

Os mapas temáticos do LE estão representados nas Figuras 36 e 37, referentes aos dias 17/12/2008 e 02/01/2009, respectivamente. Nas referidas figuras, as áreas de cores vermelha e

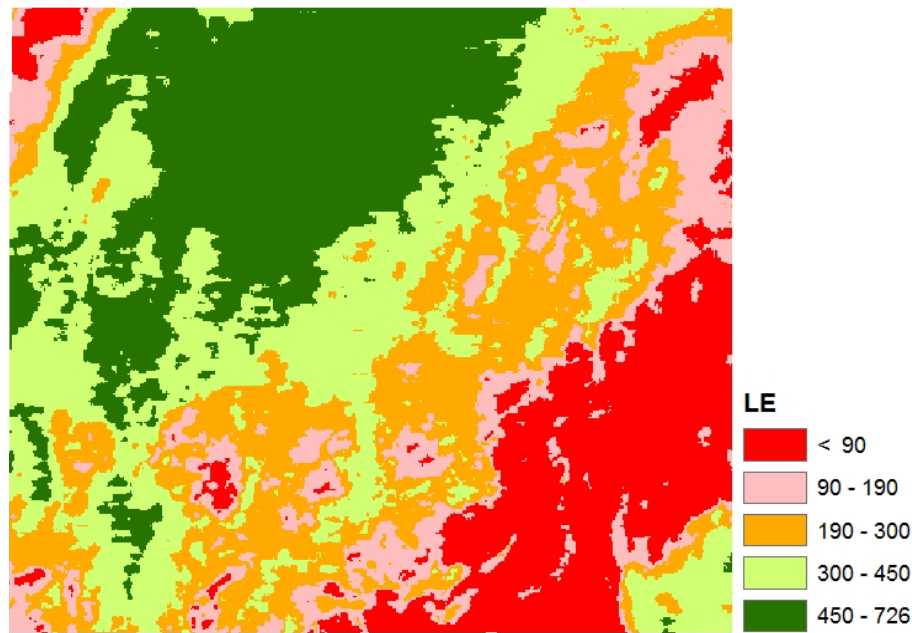
bege representam valores de LE menores que  $90 \text{ W m}^{-2}$  e de  $90$  a  $190 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente. Essas são áreas de solo exposto ou de vegetação nativa que não tem presença de nuvens e com evapotranspiração muito baixa ou próxima de zero. Esses resultados corroboram com Moreira (2007) que, na mesma região, obteve fluxo de calor latente inferior a  $200 \text{ W m}^{-2}$  em áreas com mesma característica, analisando imagens do TM-Landsat 5 no mês de agosto de 2006. Gomes (2009) obteve uma LE inferior a  $260 \text{ W m}^{-2}$  em áreas de caatinga no sertão de Pernambuco.

Nas regiões com LE superiores a  $300 \text{ W m}^{-2}$  existe a presença de nuvens. Comparando as figuras de composição em RGB nas imagens, observa-se que o verde escuro nos mapas representativos de LE superiores a  $450 \text{ W m}^{-2}$  corresponde às áreas de topo das nuvens mais densas.

Nas áreas irrigadas e sem cobertura de nuvens do perímetro do Baixo Acaraú o LE está dentro da faixa de  $190$  a  $300 \text{ W m}^{-2}$ . Moreira (2007) obteve um LE médio de  $450 \text{ W m}^{-2}$  em áreas de pivôs centrais na chapada do Apodi-CE usando imagens de agosto de 2006. Bezerra et al. (2008) obtiveram LE médio de  $550 \text{ W m}^{-2}$  em áreas de algodão irrigado no município de Barbalha – CE, usando imagens de setembro de 2005.



**Figura 36** - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Latente ( $\text{W m}^{-2}$ ) no dia 17/12/2008 no Baixo Acaraú.



**Figura 37** - Imagem Temática do Fluxo de Calor no Latente ( $W m^{-2}$ ) no dia 02/01/2009 no Baixo Acaraú.

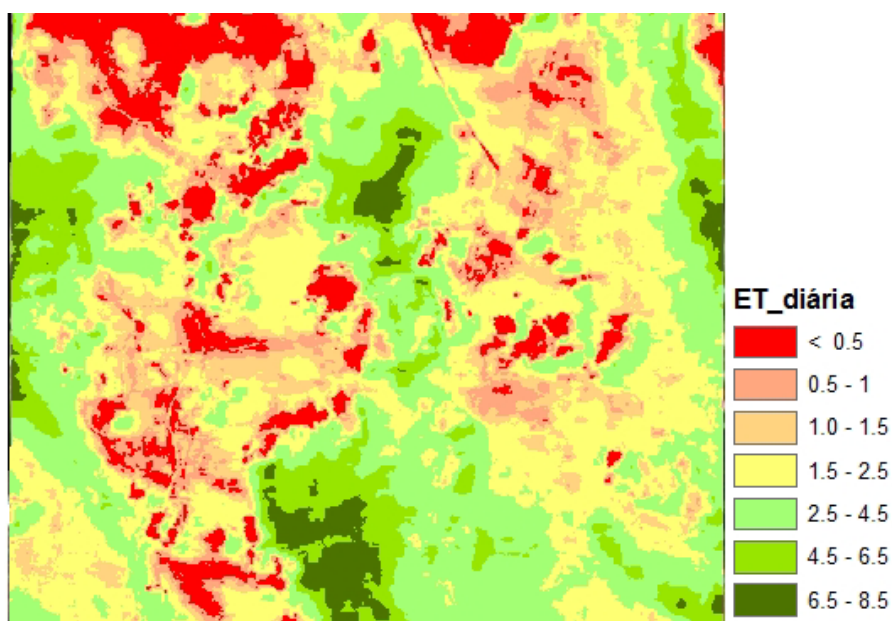
#### 4.5.6 Mapas Temáticos da Evapotranspiração Diária ( $mm dia^{-1}$ )

Nas Figuras 38 e 39 estão representados os mapas temáticos da evapotranspiração real diária ( $ET_{24h}$ ), da região do Baixo Acaraú nas duas datas selecionadas. Os mapas da  $ET_{24h}$  foram obtidos em função da evapotranspiração real horária e da evapotranspiração horária de referência ( $ETo$ ) da FAO-56 (Tasumi, 2003; Trezza, 2002; Silva et al., 2006; Bezerra et al., 2008).

As áreas na cor vermelha e bege representam valores de  $ET$  inferiores a  $0,5 mm dia^{-1}$  e variando de  $0,5$  a  $1 mm dia^{-1}$ , respectivamente. Essas são áreas que correspondem a superfícies desprovidas de vegetação ou com vegetação nativa muito rala. Bezerra (2006), estudando uma região próxima a chapada do Araripe-CE, encontrou uma  $ET$  variando de  $1,0$  a  $3,0 mm dia^{-1}$  em uma vegetação nativa com pouca folhagem. Meireles (2007), estudando a região do alto Acaraú obteve  $ET$  no mesmo tipo de vegetação inferiores a  $1,5 mm dia^{-1}$ .

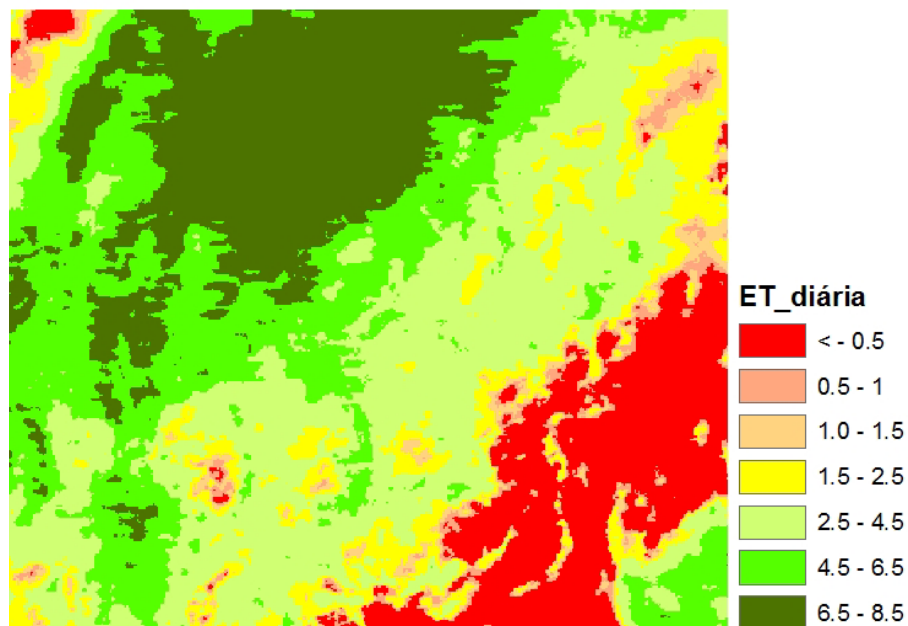
As áreas com valores de  $ET$  maiores que  $6,5 mm dia^{-1}$  são representadas nas imagens pela cor verde escuro, correspondendo a regiões com nuvens bastante densas e superfícies cobertas por água, estando presentes em maior concentração no dia 02/01/2009. As áreas de coloração verde claro, em que a  $ET$  varia de  $4,5$  a  $6,5 mm dia^{-1}$ , estão, em sua maioria, circundando as nuvens densas. A observação das Figuras em RGB da região induz à conclusão de que são nuvens de baixa densidade.

A área da melancia apresentou uma ET média de 6,5 e 4,0 mm dia<sup>-1</sup> nos dias 17/12/2009 e 02/01/2009, respectivamente. Nagler et al. (2005), em estudo no Novo México com dados MODIS, obtiveram valores de 6,0 mm dia<sup>-1</sup> para culturas irrigadas (algodão). Bezerra et al. (2008) encontraram ET média de 6 mm dia<sup>-1</sup>, também em uma área de algodão irrigado no município de Barbalha-CE. Sobrino et al. (2005) no campo experimental de Barrax a oeste da província de Albacete, na Espanha, obtiveram valores entre 3,60 mm dia<sup>-1</sup> e 5,02 mm dia<sup>-1</sup> para a cultura da cevada e ET na faixa de 4,79 mm dia<sup>-1</sup> a 5,50 mm dia<sup>-1</sup> para a alfafa. Ainda no mesmo estudo, os autores obtiveram valores em torno de 7 mm dia<sup>-1</sup> para pivô central. Folhes (2007) obteve ET variando de 6 a 7 mm dia<sup>-1</sup> em áreas de pivôs centrais na chapada do Apodi, município de Limoeiro do Norte-CE.



**Figura 38** - Mapa Temático de ET<sub>24h</sub> no dia 17/12/2008 no Baixo Acaraú.





**Figura 39** - Mapa Temático de  $ET_{24h}$  no dia 02/01/2008 no Baixo Acaraú.

## 4.6 Validações do SEBAL

### 4.6.1 Densidades de fluxo de energia.

Para calibração e validação do SEBAL foram feitas comparações entre os fluxos instantâneos medidos com o método FAO e correlações turbulentas na área da melancia com os dados estimados com o algoritmo.

Como podem ser observadas nas Figuras 28 e 29, as imagens de satélite nas duas datas estudadas têm presença de nuvens, principalmente sobre a área da melancia, comprometendo os dados radiométricos da banda 6, fundamental para a estimativa da temperatura da superfície. Esse é um fator limitante para determinação dos fluxos instantâneos, principalmente para o fluxo de calor sensível que depende basicamente da diferença de temperatura entre a superfície e o ar próximo dela (Allen et al., 2002; Trezza, 2002).

A temperatura estimada pelo SEBAL em áreas com presença de nuvens é a temperatura das nuvens, portanto são baixas temperaturas que proporcionam pequenos fluxos de calor sensível, ocasionando assim uma superestimativa da evapotranspiração real como comentam Bezerra et al. (2008).

Na tentativa de fazer um ajuste para melhor determinação dos fluxos instantâneos pelo SEBAL, na área da melancia, foram usadas duas metodologias para correção: SEBAL\_C1 (SEBAL correção 1) – próximo a área da melancia foi selecionado uma área irrigada na



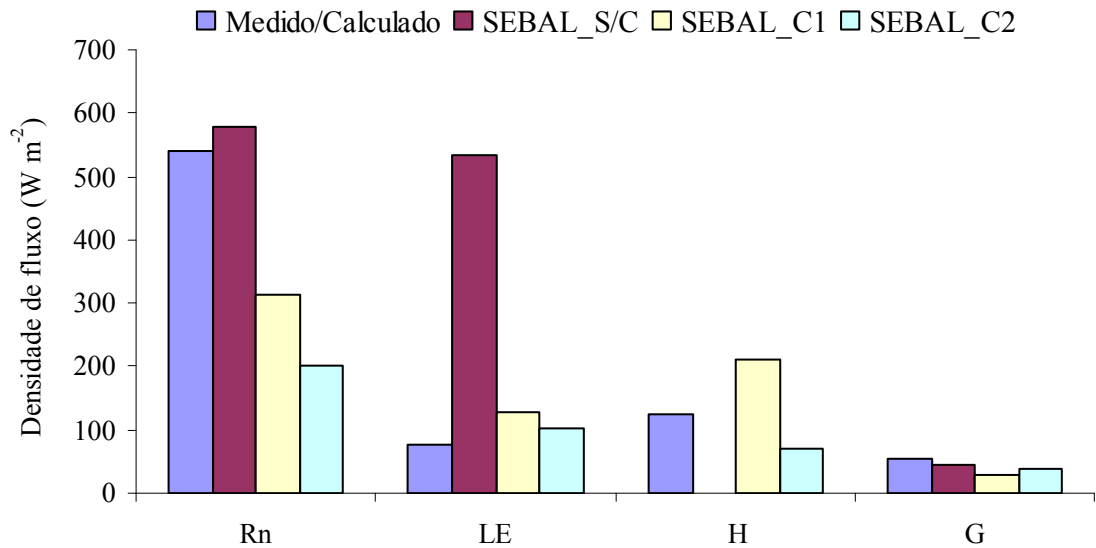
ausência de nuvens onde foi usado o desvio médio das informações radiométricas das bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 entre a área da melancia e a área de correção, equação 33.

$$ND_{C(i)} = ND_{S/C(i)} + \frac{\sum (ND_{I(i)} - ND_{S/C(i)})}{NP_{(i)}} \quad (33)$$

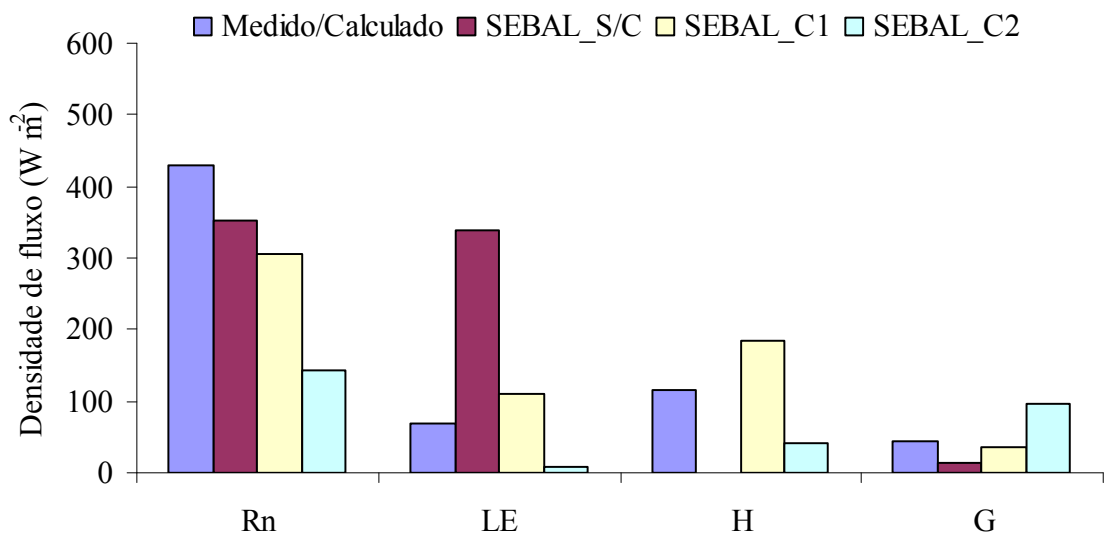
Em que:  $ND_{C(i)}$  é o novo número digital da banda  $i$  corrigida na área da melancia,  $ND_{S/C(i)}$  é o número digital da banda  $i$  na área da melancia sem correção,  $ND_{I(i)}$  é o número digital da banda  $i$  na área irrigada vizinho a área da melancia,  $NP_{(i)}$  é o número de pixels da banda  $i$  em que foi feita a correção na área da melancia,  $i$  são as bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

SEBAL\_C2 (SEBAL correção 2) – Na área da melancia foram instalados sensores de temperaturas (LM 35) a diferentes alturas a partir da superfície do solo. Foi usada a temperatura do sensor na superfície às 9 horas da manhã (passagem do satélite) como a temperatura calculada pelo algoritmo SEBAL evitando assim o uso das informações da banda 6.

As Figuras 40 e 41 mostram a comparação entre os fluxos instantâneos medidos na área e os fluxos instantâneos estimados pelo SEBAL antes (SEBAL\_S/C) e depois das correções (SEBAL\_C1 e SEBAL\_C2) nos dias 17/12/2008 e 02/01/2009, respectivamente.



**Figura 40** - Fluxos instantâneos medidos em campo e obtidos pelo SEBAL com e sem correções em 17/12/2008.



**Figura 41** - Fluxos instantâneos medidos em campo e obtidos pelo SEBAL com e sem correções em 02/01/2009.

A radiação líquida ( $R_n$ ) estimada pela metodologia da FAO na hora da passagem do satélite, no dia 17/12/2008, foi de  $540 \text{ W m}^{-2}$  enquanto no dia 02/01/2009, foi de  $430 \text{ W m}^{-2}$ . Na primeira data o erro relativo do  $R_n$  medido e o estimado pelo algoritmo SEBAL, sem correção (SEBAL\_S/C) e com as correções SEBAL\_C1 e SEBAL\_C2 foi, respectivamente, 7,3%; 41,8% e 62,5%. Já na segunda data analisada esse erro foi menor para o SEBAL\_C1 e maior para o SEBAL\_C2, assumindo valores de 18%; 28,8% e 67%, respectivamente. Bastiaanssen (1998), no trabalho de validação do SEBAL, obteve erros de  $R_n$  medidos e estimados pelo algoritmo próximos a 5%, Bezerra (2006) obteve um erro de 11% em uma área de algodão irrigado, Gomes (2009) obteve um erro máximo na estimativa do  $R_n$  de 15,29% em um cultivo de cana de açúcar.

O fluxo de calor latente (LE) medido pelo método das correlações turbulentas, na hora da passagem do satélite no dia 17/12/2009, foi de  $77,57 \text{ W m}^{-2}$  e, no dia 02/02/2009, foi  $69,9 \text{ W m}^{-2}$ . Diferente da  $R_n$ , os valores de LE estimados pelo SEBAL com e sem correção foram superiores aos valores medidos na área, fato que pode estar associado a subestimação do LE pelo método das correlações turbulentas como foi comentado por Twine et al. (2000). Os erros relativos do LE medido e estimado pelo SEBAL\_S/C, SEBAL\_C1 e SEBAL\_C2 foram 85,4%; 38,8% e 23%, respectivamente, para o dia 17/12/2008, e 73,9%; 36% e 7,3%, respectivamente, para o dia 02/01/2009.

Bezerra (2006) encontrou um erro relativo de 26% na estimativa do LE monitorando uma área cultivada com mamona. Gomes (2009), usando diferentes metodologias para determinar LE, observou que as maiores diferenças foram obtidas entre o SEBAL e as

medições diretas (correlações turbulentas) na área de cana de açúcar, com erros relativos médios chegando a 77,0 %.

O fluxo de calor sensível (H) medido pelo método das correlações turbulentas, na hora da passagem do satélite no dia 17/12/2009, foi de 124,68 W m<sup>-2</sup> e no dia 02/02/2009, foi 115,03 W m<sup>-2</sup>. O erro relativo do LE medido e estimado pelo SEBAL\_S/C, SEBAL\_C1 e SEBAL\_C2 foi de 99,9%; 41% e 19%, respectivamente, para o dia 17/12/2008, e 100%; 37,9% e 92,7%, respectivamente, para o dia 02/01/2009. O que pode ser observado é que no SEBAL\_S/C o H estimado foi praticamente zero devido à presença de nuvens, subestimando o valor da temperatura e assim, comprometendo o computo dos outros fluxos.

Gomes (2009) obteve erros relativos médios de 71,4% comparando H medido (correlações turbulentas) e estimado pelo SEBAL em uma área de cana de açúcar. Bezerra (2006) obteve erro médio de H de 34,85% em algodão irrigado. O autor supracitado comenta que os resultados discrepantes obtidos, principalmente associados ao fluxo de calor sensível (H), deve-se, provavelmente, ao fato das medidas de campo terem sido feitas sobre um campo irrigado, ocupando uma área de aproximadamente 1 ha, o que para o autor não é o ideal para o uso do método.

O cômputo de H pelo SEBAL tem em consideração a diferença de temperatura entre o ar próximo a superfície e a 2 m acima da vegetação predominante em cada pixel obtida com base na imagem de temperatura da superfície, e calculada com base na radiância do canal termal. O mesmo tem resolução espacial de 120 m x 120 m, o que implica em uma área de 14.400 m<sup>2</sup> ou 1,44 ha. A área cultivada com melancia não necessariamente estará centrada no pixel e isto pode ter dificultado a identificação exata da área e, conseqüentemente, a obtenção exata dos valores de H e demais componente do balanço de energia.

Em outros estudos de validação, como os de Bastiaanssen et al. (1998) e Feitosa (2005), os valores de erros médios foram baixos porque seus experimentos foram instalados em áreas maiores e com vegetação bem uniforme.

O fluxo de calor no solo (G) estimado segundo metodologia da FAO, na hora da passagem do satélite no dia 17/12/2009, foi de 54 W m<sup>-2</sup> e no dia 02/02/2009 foi 43 W m<sup>-2</sup>. O erro relativo do LE medido e estimado pelo SEBAL\_S/C, SEBAL\_C1 e SEBAL\_C2 foi de 14,8%; 49% e 27,5%, respectivamente, para o dia 17/12/2008, e 67,4%; 18,8% e 1,23%, respectivamente, para o dia 02/01/2009.

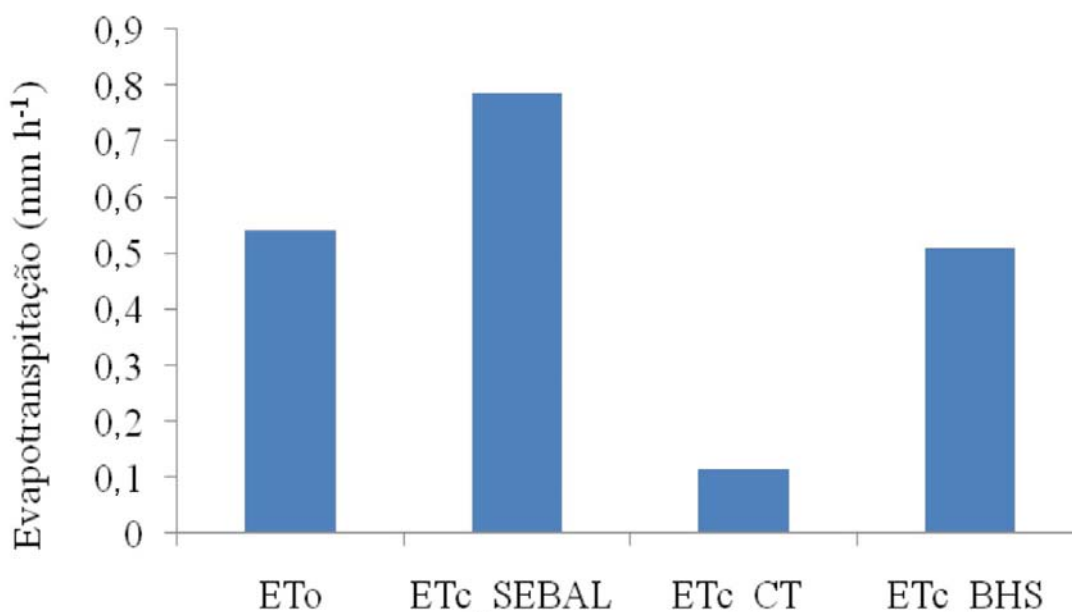
Bastiaanssen et al (1998) afirmam que, entre os componentes do balanço de radiação, o G é o que apresenta piores resultados quanto ao ajuste porque essas medidas são pouco representativas para áreas muito pequenas nas quais são minimizadas as influências da

variação do tipo de solo e da cobertura vegetativa, incompatível com o tamanho do pixel do sensor TM. Para esse trabalho o G apresentou os menores erros.

Observa-se que de todas as correções feitas a que apresentou melhores resultados foi SEBAL\_C1, isso certamente devido ao ajuste feito no número digital de todas as bandas, influenciando assim todos os parâmetros do algoritmo. O SEBAL\_C2 apresentou uma melhor aproximação para o fluxo de calor sensível, fato associado à correção da temperatura.

#### 4.6.2 Validação do SEBAL – Evapotranspiração

A Figura 42 mostra uma análise comparativa entre os métodos que foram usados para estimar a evapotranspiração horária na área da melancia. A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), evapotranspiração estimada com o algoritmo SEBAL (ET<sub>c</sub>\_SEBAL), evapotranspiração com estação meteorológica através do método das correlações turbulentas (ET<sub>c</sub>\_CT) e evapotranspiração com balanço hídrico no solo (ET<sub>c</sub>\_BHS) que correspondem a hora da passagem do TM-Landsat 5 no dia 17/12/2008 sobre a área da melancia.



**Figura 42** – Análise comparativa entre os métodos de estimativa de evapotranspiração no dia 17/12/2008.

A ET<sub>o</sub> foi de 0,53 mm h<sup>-1</sup>, enquanto a ET<sub>c</sub> foi de 0,78; 0,11 e 0,55 mm h<sup>-1</sup> estimados com o SEBAL, métodos das correlações turbulentas e balanço hídrico no solo com o sensor capacitivo, respectivamente. A diferença relativa entre o SEBAL e as correlações turbulentas foi de 85%, enquanto que o balanço hídrico no solo foi de 31%.

A grande diferença observada entre a evapotranspiração estimada pelo método das correlações turbulentas e outros métodos pode ser associada ao tamanho da área. Costa (2007) afirma que a aplicação do método das correlações turbulentas pressupõe a existência de uma superfície homogênea e suficientemente extensa para que possa garantir um *fetch* adequado para as medições. Apesar dos instrumentos ficarem a 80 cm da superfície vegetal e no centro da área, 1 ha pode não ser o tamanho de área ideal para a utilização desse método.

No entanto, vale ressaltar que os valores horários medidos são baseados em médias de 15 minutos e o resultado estimado pelo SEBAL é um valor integrado num intervalo de uma hora a partir do resultado instantâneo do LE para o momento do imageamento. Segundo Allen et al. (2002), esse resultado expressa a ET para o intervalo de 9:00 às 10:00 h.

Bezerra et al. (2008), validando o algoritmo SEBAL em algodão irrigado no município de Barbalha - CE encontrou uma diferença relativa mínima de 6,2% e um máximo de 20,0% entre evapotranspiração medida e estimada pela razão de Bowen. A validação feita por Bastiaanssen et al. (1998) baseou-se em dados coletados sobre áreas desérticas e áreas de oásis. As áreas que envolveram a torre de coleta de dados nesse estudo eram maiores e mais homogêneas.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante dos resultados obtidos com a pesquisa, conclui-se que:

- A temperatura do ar tende a aumentar exponencialmente a partir da superfície para ficar estável a cerca de 0,5 m, portanto, esta deve ser a altura mínima para instalação de sensores.
- A evapotranspiração da melancia medida pelo balanço hídrico no solo com sensores capacitivos tendeu a ser superestimada em relação aos valores reportados na literatura.
- Devido provavelmente ao tamanho e homogeneidade da área, o método das correlações turbulentas subestimou o fluxo de calor latente, portanto, não foi uma boa referência para validar o SEBAL.
- O fechamento do balanço de energia foi comprometido já que não foi possível medir a radiação líquida e o fluxo de calor no solo na área da melancia.
- A  $E_{Tc}$  obtida pelo balanço hídrico do solo, foi a que mais se aproximou aos valores obtidos pelo SEBAL.
- As metodologias adotadas para correção e validação do SEBAL melhoraram a precisão da evapotranspiração estimada pelo algoritmo, já que o efeito da presença das nuvens foi diminuído.

Como sugestão para continuidade dessa pesquisa sugere-se repetir o experimento em áreas maiores (acima de 4 ha ) e em diferentes locais e períodos do ano, possibilitando maior representatividade nas variáveis obtidas pelo método das correlações turbulentas (eddy correlation) e a aquisição de imagens de satélite em tempo aberto, eliminando as limitações impostas pela forte presença de nuvens.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, M.; BASTIAANSSEN, W. G. M. Retrieving soil moisture storage in the unsaturated zone using satellite imagery and bi-annual phreatic surface fluctuations. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 17, 141-161 p., 2003.

ALLEN, R. G., JENSEN, M. E., BORNAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**. Madison, v. 81, p.650-662, 1989.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M.; **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome-Italy, 1998.

ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI M.; **Surface energy balance algorithms for land - Advance training and users manual**, version 1.0, p. 98, 2002.

ANDRADE, E. M.; AQUINO, D. N.; CRISOSTOMO, L. A.; RODRIGUES, J. O.; LOPES, J. F. B. Impacto da lixiviação de nitrato e cloreto no lençol freático sob condições de cultivo irrigado. **Ciência Rural**, v.39, n.1, p.88-95, 2009.

ARAUJO, D. F. de.; Calibração de sensores de umidade tipo resistência elétrica e teste de sistema de comunicação sem fio para monitoramento do potencial da água no solo. Fortaleza, CE. 2008. 74 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.

ARRUDA et al. Aplicação de três metodologias para estimar o fluxo de calor latente em floresta de transição. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 21, n. 3b, p. 233-240, dez., 2006.

ARRUDA, J. C.; JORGE, A.; FILHO, N. P.; NOGUEIRA, J. S.; FILHO, E. O. A.; JÚNIOR, J. H. C.; VOURLITIS, G. L. Aplicação de três metodologias para estimar o fluxo de calor latente em floresta de transição. **Rev. Bras. de Meteorologia**. v.21, n.3b, 233-240, 2006

ARYA, S. P. **Introduction to Micrometeorology**. San Diego: Academic Press, 1988.

ATAÍDE, K. R. P.; **Determinação do saldo de radiação e radiação solar global com produtos do sensor Modis Terra e Aqua**; Campina Grande, 105f, Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 2006.

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

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M.; A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1, Validation, **Journal of Hydrology**, n. 212-213, p. 213-229, 1998.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; **Regionalization of surface flux densities and**

**moisture indicators in composite terrain**, Tese (Ph.D.), Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 273f, 1995.

BASTIAANSEN, W. G. M.; ZWART, S. J. 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.

BEZERRA, B. G.; **Obtenção da evapotranspiração diária no Cariri Cearense utilizando imagens TM-Landsat 5 e o algoritmo SEBAL**; 135 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

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, n.3, 305-317, 2008.

BEZERRA, F. M. L.; OLIVEIRA, C. H. C. de.; Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura nos estádios fonológicos da melancia irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.2, p.173-177, 1999

CARVALHO, L. A. de.; LIBARDI, P. L.; ROCHA, G. C.; CRUZ, A. C. R.; Caracterização hidráulica de um latossolo vermelho associado à caracterização pedológica do perfil. **Ciência Rural**, v. 37, n. 4, p. 1008 – 1013, julho/agosto 2007.

CARVALHO, L. C. C. de.; BEZERRA, F. M. L.; CARVALHO, M, A. R. de. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da melancia sem sementes. **Rev. Ciênc. Agron**, Fortaleza, v. 39, n. 01, p. 53-59, Jan.-Mar., 2007

COELHO, S. L. **Desenvolvimento de um tensiômetro eletrônico para monitoramento do potencial de água no solo**. 2003. 106 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará.

COSTA, P. C. *Consumo Hídrico de Bananeira Irrigada na Região da Chapada do Apodi*. 2007. 77 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

COURAULT, D.; SEGUIM, B.; OLIOSO, A. **Review to estimate vapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use mesoscale atmospheric models**. ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions, 17 Sept., 2002.

CRUZ, T. M. L; Avaliação de um sensor capacitivo para o monitoramento da umidade do solo. 2007. 87. p. Monografia (Agronomia), Universidade Federal do Ceará.

DUFRANC, G.; DECHEN, S. C. F.; FREITAS, S. S. e CAMARGO, O. A.. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois latossolos em plantio direto no Estado de São Paulo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. 2004, vol.28, n.3, pp. 505-517. ISSN 0100-0683.



DURAND, B. J., GONDIM, R. S., SILVA, E. J. da., MOREIRA, L. C. J., TEIXEIRA, A. S. dos. Estimativa da evapotranspiração real utilizando o algoritmo SEBAL e imagens do satélite Landsat 7. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007., São Paulo. **Anais...** São Paulo, ABRH.

DURNEY, C. H. **Circuitos elétricos**: teoria e aplicação em engenharia. Rio de Janeiro: Campus, 1985. 485 p.

ELLIES, A., GREZ, R., RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta par el diagnostico de la estructura del suelo. **Agro Sur**, v.5, p.51-56, 1997.

FEDRO S. ZAZUETA & JIANNONG XIN, Soil Moisture Sensors, University of Florida. Bulletin 292, 1994. 12p.

FEITOSA, J. R. P. Uso de Técnica de Sensoriamento Remoto e Imagens TM-Landsat e NOAA-AVHRR na estimativa do balanço de radiação à superfície. 164f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Programa Institucional de Pós-graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2005.

FOLHES, M. T. Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos. Tese de D.Sc., INPE, São José dos Campos, SP, Brasil, 2007.

FREITAS, A. A. de.; BEZERRA, F. M. L.; FONTENELE, F. C. B. de. Determinação da evapotranspiração máxima e real e do fator de sensibilidade ao déficit hídrico da melancia em Canindé, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.298-303, 1999.

GOMES, H. B.; Balanço de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais. 124f. Tese (**Doutorado em Recursos Naturais**) Programa Institucional de Pós-graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009.

HICKEY, H. V. **Elements of electronics**. New York: McGraw-Hill, 1961. 549 p.

HILLEL, D. Soil water – physical principles and processes. New York: Academic Press, 1971.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring hydraulic characteristics “in situ”. **Soil Science**, v. 144, p. 395-400, 1972.

HILLEL, Daniel. Fundamentals of soil physics. Academic Press, Inc., 1980.

JONG VAN LIER, Q. & LIBARDI, P.L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:1005-1014, 1999.

KIMURA, R. L. B.; FAN, J.; TAKAYAMA, N.; HINOKIDANI. O.;

Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. **Journal of Arid Environments**, n. 68, p. 53-65, 2007.

KLAR, A. E. A água no sistema solo-planta-atmosfera. 2ª ed. São Paulo. Nobel, 1988. 408p.

KLEIN, Vilson Antonio & LIBARDI, Paulo Leonel. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Cienc. Rural* [online]. 2002, v. 32, n. 6, pp. 945-953. ISSN 0103-8478.

LEÃO, R. A. O. de.; TEIXEIRA, A. S. dos.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; MESQUITA, P. E. G.; COELHO, S. L. de.; Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para calibração de sensores de umidade de solo. **Revista Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.294-303, jan./abr. 2007.

LEÃO, R. A. O. **Desenvolvimento de dispositivo para calibração de sensor de umidade do solo e aplicação em sensores tipo tensiômetro eletrônico e resistência elétrica**. 2005. 72 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da Água no Solo*. 2.ed. Piracicaba: 2004. 509 p.

LIBARDI, P.L. et al. Simple field methods for estimating hydraulic conductivity. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.3-7, 1980.

LIMA, J. R. S. de.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, B. E.; SILVA, I. F. da.; L, C. A. B. O. de.; Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, n. 4, v. 9, p. 527 – 534, 2005.

MANZI, A. O. & SANTOS, A. **LBA - São Gabriel da Cachoeira - Amazonas**. 2004.

MEDINA, J. L.; CAMACHO, E.; RECA, J.; LÓPEZ, R.; ROLDÁN, J. **Determination na Analysis of Regional of Regional Evapotranspiration in Southern Spain Base don Remote Sensing and Gis**; *Physics and Chemistry of the Earth*. V. 23, n. 4, p.427-432. 1998.

MEIRELES, M. **Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo sebal e imagem Landsat 5 - TM na bacia do Acaraú – CE**. Fortaleza, CE. 2007. 88 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.

MIGUEL, M. G. TEIXEIRA, R. S. PADILHA, A. C. C.; Curvas Características de sucção do solo laterítico da região de Londrina/PR. **Revista de Ciência & Tecnologia**. V. 12, n. 24, p. 63 – 74, 2006.

MIGUEL, M. G.; TEIXEIRA, R. S.; PADILHA, A. C. C. Curvas características de sucção do solo laterítico da região de Londrina/PR. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 12, nº 24, pp. 63-74, 2006.

MIRANDA, F. R. de.; OLIVEIRA, J. J. G.; SOUZA, F. de. Evapotranspiração máxima e coeficientes de cultivo para a cultura da melancia irrigada por gotejamento. **Revista Ciência Agronômica**, vol. 35, n.º. 1, jan – jun, 2004. p. 36 – 43.

MIRANDA, J.H.; PIRES, C.M.P. Irrigação. Piracicaba: FUNEP, 2001. 410p.(Série Engenharia Agrícola, 1).

MONTENEGRO, A. A. T.; **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo do mamoeiro obtidos através do método do balanço hídrico para região litorânea do Ceará.** 2002. 76p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade federal do Ceará.

MOREIRA, L. C. J.; Estimativa da evapotranspiração horária usando o algoritmo SEBAL e imagens do Landsat 5-TM. 2007. 91. p. Monografia (Agronomia), Universidade Federal do Ceará.

NADLER, A.; LAPID, Y. **An improved capacitance sensor for in situ monitoring of soil moisture.** Australian Journal of Soil Research, Collingwood, v. 34, n. 3, p. 361-368, 1996.

NAGLER, P. L.; SCOTT, RL.; WESTENBURG, C.; CLEVERLY, J. R.; GLENN, E. P.; HUETE, A. R. Evapotranspiration on western U.S. rives estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy correlation an Bowen ratio flux towers. **Remote Sensing of environment.** Article in press. 2005.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates.** 2. ed., London: Routledge, 1978.

OLIVEIRA, A. D. S. de.; Avaliação do sensor de umidade TOPDEA no manejo da irrigação. Fortaleza, CE. 2008. 65 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.

PAÇO, T. A. et al. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by FAO 56 approach. **Agricultural Water Management.** 2006, p. 1-9.

PAÇO, T. A. et al. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by FAO 56 approach. **Agricultural Water Management.** 2006, p. 1-9.

PAÇO, T. A. **Modelação da evapotranspiração em cobertos descontínuos: programação da rega em pomar de pessegueiro.** Tese (Doutoramento em Engenharia Agrônômica), Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2003.

PAIVA, C. M., Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR, Rio de Janeiro, 248f, Tese (**Doutorado em Engenharia Civil**) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba-RS: Livraria e Editora gropecuária Ltda, 2002.

PRESA, E.P. Deformabilidade de las Arcilas Expansivas bajo Succión Controlada. Tese Doutorado, E. T. S. de Ing. de caminos canales y puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 1982.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo. Com problemas resolvidos**. Curitiba. 446 p. 1996.

REICHARDT, K. A Água em Sistemas Agrícolas. São Paulo: Manole, 1985.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física 3**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 1992. 303 p.

SALES, B. B., Dinâmica da água em solo cultivado com feijão caupi em região de brejo de altitude. Recife, 86f, Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Pernambuco.

SAN JOSÉ, J.J.; BRACHO, R.; MONTES, R.; NIKONOVA, N. Comparative energy Exchange from cowpeas (*Vigna unguiculata* (L) Walp) cvs. TC-9-6 and M-28-6-6) with differences in canopy architectures and growth durations at the Orinoco llanos. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.116, n.3-4, p.197-219, 2003.

SANTIAGO, A. V.; **Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decenal**. 2001. 37 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2001.

SCHMID, H. P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. **Agricultural and Forest Meteorology**. 2002, p. 159-183.

SIEMENS. **Sensores e redes de sensoriamento – AS interface**. Seminários Técnicos, Engenheiros e Projetistas, 56 p. Maio de 2003.

SILVA, B. B. da ; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, SP, v.14, p.1-10, 2006.

SILVA, B. B. da.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de.; Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 . TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SILVA, I. O. *Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo*. 2005. 86 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SIMMONS, L. J. et al. An evaluation of two inexpensive energy-balance techniques

for measuring water use in flood-irrigated pecans. **Agricultural Water Management**. 2006, p. 181-191.

SMITH, M.; Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements: Rome: FAO, 1991. 54 p.

SOBRINO, J. A.; GÓMEZ, M.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; OLIOSO, A.; CHEHBOUNI, G. A Simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: Application to the DAISEX campaigns. **Journal of Hidrology**. v. 315. p. 117-125. 2005.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Netherlands: Kluwer Academy Publishers, 1988.

SWINBANK, W. C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. **Journal of Meteorology**, Boston, v. 8, n. 3, p. 135-145, 1951.

TASUMI, M.; **Use of remote sensing of evapotranspiration for large regions**. International Workshop, Montpellier, France, 2003.

TEIXEIRA, A. H. C. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 28-32, 2001.

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. 49, p. 462-476, 2009.

TREZZA, R.; **Evapotranspiration using a satellite-based Surface energy balance with Standardized ground control**. 247f. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering). Utah State University. Logan, Utah, 2002.

TRINTINALHA, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; TORMENA, C. A.; BERTONHA, A.; TSUKADA, J. **Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica de TDR em um nitossolo vermelho distroférico**. Acta Scientiarum, Maringá, vol. 23, nº 5, p. 1165-1171, 2001.

TWINE, T. E. et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**. 2000, p. 279-300. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15/02/2007.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

WATSON, K.K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. **Water Resources Research**, Washington, v.2, p.709-715, 1966.

WILSON, K. et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**. 2002, p. 223-243.

## ANEXO

Anexo 1 – Programa feito no MATLAB 7.0.1 para separação das leituras dos sensores capacitivos de umidade de solo.

```
teste=load('c:\dadostt.txt');
k=1;
j=1;
estado=1;
for i=1:size(teste,1)          switch estado
    case 1
        if teste(i)~=0
            leitura(k,j)=(teste(i+1)+teste(i+2))/2;
            if j<4
                j=j+1;
            else
                j=1;
                k=k+1;
            end;
            estado=2;
        end;
    case 2
        if teste(i)==0
            estado=1;
        end;
end;
end;
csvwrite('c:\arquivo.csv',leitura);
```

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)