



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS - DCA

PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

OBTENÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DIÁRIA ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

CAMILLA KASSAR BORGES

CAMPINA GRANDE – PB

MARÇO DE 2013

CAMILLA KASSAR BORGES

**OBTENÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DIÁRIA ATRAVÉS DA
APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Meteorologia da Universidade
Federal de Campina Grande como requisito
para a obtenção do título de Mestre em
Meteorologia.

Área de concentração: **Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia**

Subárea: **Sensoriamento Remoto Aplicado**

Orientador: **Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos**

CAMPINA GRANDE – PB

MARÇO DE 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B732o Borges, Camilla Kassar.
Obtenção da evapotranspiração real diária através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto no semiárido brasileiro / Camilla Kassar Borges. – Campina Grande, 2013.
79 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2013.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos".
Referências.

1. Evapotranspiração. 2. Semiárido. 3. SEBAL. 4. S-SEBI.
5. SSEB. I. Santos, Carlos Antonio Costa dos. II. Título.

CDU 551.573(043)


CAMILLA KASSAR BORGES

OBTENÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DIÁRIA ATRAVÉS DA
APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/03/2013

BANCA EXAMINADORA


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


Prof.ª Dra. CLÊNIA RODRIGUES ALCÂNTARA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


DR. BERGSON GUEDES BEZERRA
Programa de Capacitação Institucional - Ministério da Ciência e Tecnologia-CNPq
Instituto Nacional do Semiárido

Às pessoas mais importantes da
minha vida: minha amada mãe e
meu pai, Luciene Maria Nassar
Borges e Guilherme Augusto
Nogueira Borges,
DEUSE.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Luciene Maria Kassar Borges, ao meu pai Guilherme Augusto Nogueira Borges, as minhas avós Alyete Nogueira Borges e Neide Castrillon Kassar, ao meu irmão Gabriel Augusto Kassar Borges, e a todos os meus familiares, tios (as), primos (as).

Ao Professor, Orientador, Dr. Carlos Antônio da Costa dos Santos, pela atenção, paciência, ensinamentos e experiências compartilhadas.

A Coordenação da Pós-Graduação em Meteorologia, na pessoa do professor Enilson P. Cavalcanti e Divanete Rocha da Cruz, secretária dessa coordenação, pela amizade, dedicação e competência.

Ao corpo docente e funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA/ UFCG), que foram sempre dedicados e atenciosos.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior), pelos recursos financeiros concedidos durante todo o curso.

A Rayonil Gomes Carneiro, pelo enorme carinho, paciência sem fim, amizade e companheirismo.

As amigadas que firmei com Raimundo Mainar, Sérgio Santos, Raquel Ramos, Ana Paula Santos, Silvia Gárcez, Alexandra Tavares, Alane Saldanha, e outros tantos amigos e colegas de batalha.

E, a todos que não mencionei, mas que fizeram parte de alguma forma desta caminhada de aprendizado e realizações, Obrigada!

“Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa. Por isso aprendemos sempre.”

(Paulo Freire)

SUMÁRIO

	Páginas
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTAS DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo Geral	17
2.2. Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. Balanços de Energia e Fração Evaporativa (Λ)	18
3.2. Evapotranspiração: Conceitos e Relevância	20
3.3. Evapotranspiração de Referência (ET_0)	21
3.4. Coeficientes de Cultivo (k_C)	22
3.5. O algoritmo SEBAL – <i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>	23
3.6. O algoritmo S-SEBI – <i>Simplified Surface Energy Balance Index</i>	26
3.7. O algoritmo SSEB – <i>Simplified Surface Energy Balance</i>	29
4. MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1. Descrição da área de estudo	32

4.2. Dados.....	33
4.3. Saldo de Radiação (R_n).....	34
4.4. <i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i> (SEBAL).....	39
4.5. <i>Simplified Surface Energy Balance Index</i> (S-SEBI).....	40
4.6. A Fração de Evapotranspiração de referência horária (ET_{rf_h}) e a Evapotranspiração Real diária (ET_a).....	42
4.7. <i>Simplified Surface Energy Balance</i> (SSEB).....	43
5. RESULTADOS EDISCUSSÃO.....	45
5.1. Fluxos de energia à superfície (R_n , G , LE e H).....	45
5.2. Fração Evaporativa (λ) e fração de evapotranspiração (ET_f).....	48
5.3. Evapotranspiração Real Estimada (ET_a).....	55
6. CONCLUSÕES.....	65
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
ANEXO A.....	78
ANEXO B.....	79

LISTA DE FIGURA

	Páginas
Figura 1. Representação esquemática do gráfico de dispersão de temperatura da superfície e reflectância da superfície (albedo) (Fonte: SANTOS e SILVA, 2010).	27
Figura 2. A temperatura da superfície versus albedo da superfície, H é o fluxo de calor sensível, LE é o fluxo de calor latente e α é o albedo (Fonte: Figura adaptada de SOBRINO et al., 2005).	28
Figura 3. Gráfico de dispersão de ET_a , entre SSEB e METRIC em um campo de soja em 4 de agosto de 2001 (Fonte: SWANSON e TROOIJEN, 2007).	31
Figura 4. Mapa do Ceará com destaque para região do Baixo Jaguaribe e município de Quixeré (Fonte: SANTOS, 2009).	33
Figura 5. Distribuição das médias mensais da precipitação de 1981 a 2006. (Fonte: SANTOS e SILVA, 2008).	33
Figura 6. Fluxograma das etapas do processamento para obtenção do balanço de radiação à superfície – R_n (Fonte: SANTOS e SILVA 2010).	35
Figura 7. Correlação entre o IVDN e a fração evaporativa (λ) calculada através do algoritmo SEBAL de imagens dos dias 297/2005 (a) e 220/2006 (b).	48
Figura 8. Correlação entre o IVDN e a fração evaporativa (λ) calculada através do algoritmo S-SEBI de imagens dos dias 297/2005 (a) e 220/2006 (b).	49
Figura 9 Correlação entre o IVDN e a fração evaporativa (ET_f) calculada através do algoritmo SSEB de imagens dos dias 297/2005 (a) e 220/2006 (b).	49
Figura 10. Correlações entre as λ do SEBAL/S-SEBI para recortes do pomar de bananeiras nos dias 297 (a) e 220 (b).	51
Figura 11. Correlações entre as λ do SEBAL/S-SEBI para recortes de mata	51

nativa (caatinga) nos dias 297 (a) e 220 (b).

Figura 12. Correlações entre as λ do SEBAL/S-SEBI para recortes de solo exposto nos dias 297 (a) e 220 (b). 52

Figura 13. Distribuição espacial da ETa (mm/dia) para o dia 297 (2005) através do SEBAL (a), S-SEBI (b), SSEB (c) e sua respectiva paleta de cores. 56

Figura 14. Distribuição espacial da ETa (mm/dia) para o dia 220 (2006) através do SEBAL (a), S-SEBI (b), SSEB (c) e suas respectivas paletas em tons de cinza. 57

Figura 15. Correlações entre a ETa do SEBAL versus o S-SEBI e SSEB para recortes do pomar de bananeiras nos dias 297 (a, b) e 220 (c, d). 58

Figura 16. Correlações entre a ETa do SEBAL versus o S-SEBI e SSEB para recortes da caatinga nos dias 297 (a, b) e 220 (c, d). 59

Figura 17. Correlações entre a ETa do SEBAL versus o S-SEBI e SSEB para recortes do solo exposto nos dias 297 (a, b) e 220 (c, d). 60

LISTA DE TABELAS

	Páginas
Tabela 1. Constantes de calibração do Landsat 5-TM (Fonte: SANTOS, 2009).	36
Tabela 2. Valores do $ESUN_{\lambda}$ ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) para o Landsat 5 – TM.	36
Tabela 3. Erro percentual do R_{n} estimado em relação ao observado para o pomar.	45
Tabela 4. Erro percentual do G estimado em relação ao observado para o pomar.	46
Tabela 5. Erros percentuais de LE e H do S-SEBI para o pomar de bananeiras em comparação ao SEBAL.	46
Tabela 6. Erros percentuais de LE e H do S-SEBI para a caatinga em comparação ao SEBAL.	46
Tabela 7. Erros percentuais de LE e H do S-SEBI para o solo exposto em comparação ao SEBAL.	47
Tabela 8. Tabela 8. Estatística do teste t – Student, onde t é o valor do teste da A calculada pelo S-SEBI/SEBAL e gl (graus de liberdade), t_c (valor crítico) e t (valor do teste).	53
Tabela 9. Fração Evaporativa (A) estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI, para o pomar, e seus respectivos erros.	53
Tabela 10. Fração Evaporativa (A) estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI, para a caatinga, e seus respectivos erros.	54
Tabela 11. . Fração Evaporativa (A) estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI, para o solo exposto, e seus respectivos erros.	54
Tabela 12. Estatística do teste t – Student, onde t_1 é o valor do teste da ETa calculada pelo S-SEBI/SEBAL, t_2 é o valor do teste da ETa calculada pelo SSEB/SEBAL e gl (graus de liberdade), t_c (valor crítico).	61

Tabela 13. *ETa* estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI e SSEB, para o pomar de bananeiras, e seus respectivos erros. 62

Tabela 14. *ETa* estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI e SSEB, para a caatinga, e seus respectivos erros. 62

Tabela 15. *ETa* estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI e SSEB, para o solo nu, e seus respectivos erros. 62

Tabela 16. Erros percentuais da *ETa* estimada pelo SEBAL em comparação a observada. 63

Tabela 17. Erros percentuais da *ETa* estimada pelo S-SEBI em comparação a observada. 64

Tabela 18. Erros percentuais da *ETa* estimada pelo SSEB em comparação a observada. 64

LISTA DE ABREVIACOES, SIGLAS E SÍMBOLOS

α –	Albedo
CE –	Ceará
cm –	Centímetros
LE –	Calor latente
H –	Calor sensível
r –	Coefficiente de correlação
K _C –	Coefficientes de Cultivo
R ² –	Coefficiente de determinação
DOA –	Dia de ordem do ano
ET _c –	Evapotranspiração da cultura
ET _a –	Evapotranspiração Real estimada
ET _o –	Evapotranspiração de referência
G –	Fluxo de calor no solo
ET _f –	Fração de evapotranspiração
Λ –	Fração Evaporativa
°C –	Grau <i>Celsius</i>
IVDN –	ndice de Vegetação por Diferena Normalizada

METRIC –	Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration
m –	Metros
mm –	Milímetros
r_{ah} –	Resistência aerodinâmica
Rn –	Saldo de radiação
SR –	Sensoriamento remoto
SEBAL –	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SSEB –	Simplified Surface Energy Balance
S-SEBI –	Simplified Surface Energy Balance Index
SEBS –	Surface Energy Balance System
TM –	Thematic Mapper
W/m^2 –	Watts por metro quadrado (unidade de potência de acordo com o S.I.)

RESUMO

A perda de água na forma de vapor da superfície para atmosfera é conhecida por evapotranspiração, a qual libera grandes volumes de água do solo por evaporação e da vegetação por transpiração. Estimar o consumo de água em áreas irrigadas é importante para um bom planejamento, gestão e uso racional deste recurso, bem como para melhorar a produção. Para este estudo serão processadas imagens orbitais de Quixeré-CE, com interesse na Fazenda Frutacor, onde há predominância da cultura da bananeira. Por isso, o principal objetivo deste estudo foi avaliar a precisão e a operacionalidade dos algoritmos S-SEBI e SSEB em relação ao SEBAL para estimar a evapotranspiração real diária (*ETA*) de uma região semiárida do nordeste brasileiro, contendo áreas do pomar de bananeiras, caatinga e solo exposto. Os modelos S-SEBI e SSEB exibiram forte correlação, de $r > 0,93$, com significância de 5% e mais de 86% de variação explicada. Verificou-se que o SSEB subestimou a *ETA* em todas as análises, e de maneira geral o S-SEBI superestimou. O S-SEBI exibiu erros inferiores a 12% no pomar e caatinga e o SSEB exibiu erros superiores a 22%, contudo para o solo exposto ambos os modelos apresentaram grandes discrepâncias em relação ao SEBAL, com erros superiores a 36%. Portanto, dentre os dois algoritmos comparados com o SEBAL, o S-SEBI mostrou melhor desempenho para estimar a *ETA* com menores discrepâncias.

Palavras-Chave: Evapotranspiração, semiárido, SEBAL, S-SEBI, SSEB.

ABSTRACT

The loss of water vapor from the surface to the atmosphere is known as evapotranspiration, which releases large volumes of water by evaporation from soil and vegetation by transpiration. Estimating water use in irrigated areas is important for good planning, management and rational use of this resource, as well as to improve production. For this study will be processed satellite images of Quixeré-CE, with interest at the Farm Frutacor where there are predominance of banana's growing. Therefore, the main objective of this study was to evaluate the accuracy and operational of the algorithm S-SEBI and SSEB in relation to SEBAL for estimating the daily actual evapotranspiration (ET_a) in a semiarid region of northeastern Brazil; containing areas of banana orchard, *caatinga* and exposed soil. The models S-SEBI and SSEB exhibited strong correlation, $r > 0.93$, with a significance of 5% and more than 86% of variance explained. It was verified that the SSEB underestimated the ET_a in all analyzes, and in general the S-SEBI overestimated. The S-SEBI exhibited less than 12% errors in the orchard and *caatinga*, the SSEB exhibited errors greater than 22%, however the soil exposed to both models showed large discrepancies in the SEBAL with error greater than 36%. Therefore, among the two algorithms compared with SEBAL, the S-SEBI showed best performance to estimate ET_a with minor discrepancies.

Keywords: Evapotranspiration, semiarid, SEBAL, S-SEBI, SSEB.

1. INTRODUÇÃO

A perda hídrica na forma de vapor da superfície (solo e plantas) para atmosfera é conhecida por evapotranspiração, a qual libera grandes volumes de água do solo por evaporação e da vegetação por transpiração para atmosfera. Estimar o consumo de água em áreas irrigadas é importante para um bom planejamento, gestão e uso racional deste recurso, bem como para otimizar a produção (ALLEN et al., 2007). Atualmente, a pressão mundial pelo aumento da produção sustentável de alimentos, que possam atender essa crescente demanda da população, conjuntamente com a redução da distribuição de água, vem indicando que o setor agrícola tem de produzir mais com menos uso desse recurso (CAI e SHARMA, 2010).

Algumas localidades, como no Brasil, possuem carência de informações pontuais meteorológicas e micrometeorológicas, dificultando a obtenção da evapotranspiração. Então a aplicação de métodos de sensoriamento remoto (SR) que permitam analisar a variabilidade espacial se torna vantajoso do ponto de vista técnico e orçamentário (SANTOS, 2009).

Existem vários modelos computacionais utilizados em sensoriamento remoto orbital, tais como o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*), SEBS (*Surface Energy Balance System*), que utilizam dados de satélite e de superfície para calcular os fluxos do balanço energia de uma cultura, e através destes estimar a evapotranspiração. Os algoritmos que serão utilizados neste trabalho para estimar a evapotranspiração real diária (*ET_a*), serão o SSEB (*Simplified Surface Energy Balance*) e o S-SEBI (*Simplified Surface Energy Balance Index*), a partir de imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) do Landsat 5. Estes modelos serão comparados às

imagens processados do SEBAL, para que possam ser examinadas suas eficácias. Visto que, o SEBAL foi aplicado e validado em inúmeras localidades ao redor do mundo (JIA et al., 2013; BASTIAANSEN et al., 2008).

Assim como o algoritmo SEBAL, o SSEB baseia-se no conceito de pixels âncoras, pixel *quente* e *frio*, representando o solo seco e exposto, e o solo úmido e bem vegetado, respectivamente (SENAY et al., 2007). Já o S-SEBI é baseado no contraste da fração evaporativa entre áreas secas e úmidas, e as correspondentes temperaturas máximas e mínimas associadas às áreas contrastantes (SANTOS e SILVA, 2010).

O modelo SSEB é bem mais simples de ser aplicado e operacionalizado que outros métodos, pois necessita de poucas etapas de processamento e apenas a evapotranspiração de referência (ET_0) como dado de superfície, além disso, a temperatura de superfície (T_s) é a primeira variável de entrada a ser usada (SENAY et al., 2011a). O S-SEBI possui vantagens em relação a outros algoritmos: não são necessários dados de estação meteorológica para calcular os fluxos de energia quando os extremos da superfície hidrológicos estão presentes; não se determina uma temperatura constante para as condições de solo seco e úmido em toda imagem (como é o caso de outros métodos), as temperaturas extremas para as condições contrastantes variam de acordo com a mudança de valores de reflectância (ROERINK et al, 2000).

Para este estudo foram processadas imagens orbitais da região de Quixeré – CE, com interesse na Fazenda Frutacor, onde há predominância de áreas com a cultura da bananeira (*Musa* sp.), fragmentos de mata nativa (caatinga) e solo exposto. Portanto, compreender o comportamento e a variabilidade espacial dos fluxos de energia à superfície dessas áreas e da ET_a , possibilitam o estudo da demanda hídrica das culturas através de modelos de *SR* orbital.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a precisão e a operacionalidade dos algoritmos S-SEBI e SSEB, comparados ao algoritmo SEBAL, para estimar a evapotranspiração real diária (ETa) de áreas do pomar de bananeiras (*Musa* sp.) irrigado, mata nativa (caatinga) e solo exposto em uma região do semiárido brasileiro.

2.2 Objetivos Específicos

- Estimar o saldo de radiação (Rn), o fluxo de calor no solo (G) e compará-los com os valores observados através de medidas em campo;
- Determinar os fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H) pelo S-SEBI e compará-los ao SEBAL;
- Estimar a fração evaporativa (A) e a evapotranspiração real diária (ETa) utilizando o algoritmo S-SEBI;
- Determinar a fração de evapotranspiração (ET_f) e a ETa diária através da aplicação do SSEB;
- Verificar a validade da ETa obtidos pelas duas metodologias com os dados processados do algoritmo SEBAL;
- Comparar a ETa estimada pelo SEBAL com a calculada a partir do coeficiente de cultivo (k_c).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As regiões áridas e semiáridas localizadas na faixa equatorial são locais onde há escassez de recursos hídricos e a energia disponível é intensa, condições estas que contribuem bastante para o processo da evapotranspiração – um dos principais componentes do ciclo hidrológico. Assim, a estimativa de evapotranspiração é importante para aplicações e/ou estudos hidrológicos, climáticos e, principalmente, no planejamento e manejo de culturas irrigadas (SOBRINO et al., 2007; SANTOS e SILVA, 2010).

Estimativas da evapotranspiração baseadas em técnicas de *SR* possuem a vantagem de oferecer informações sobre a variabilidade espacial, ao contrário da maioria dos métodos convencionais, baseados em medições pontuais. Através das variáveis observadas remotamente e processadas por meio de técnicas de *SR* que permitam caracterizar o comportamento hidrológico do terreno, combinado a informações sobre a superfície e as propriedades atmosféricas. Contribuindo dessa forma para melhoria e previsão de parâmetros hidrológicos, tais como a taxa de evapotranspiração, importante para a gestão dos recursos hídricos, especialmente em regiões agrícolas (ELHADDAD e GARCIA, 2008; ZHANG et al., 2008).

3.1 Balanços de Energia e Fração Evaporativa (*A*)

O cálculo da evapotranspiração segundo o balanço de energia da superfície, a partir do fluxo de calor latente (*LE*), como resíduo do balanço de energia (*BE*) à superfície, sendo o *BE* descrito a seguir,

$$LE = (R_n - G) - H \quad (01)$$

onde R_n representa a energia líquida radiante a superfície terrestre, chamado de saldo de radiação; LE é o fluxo de calor latente (usado para evapotranspiração), H é o fluxo de calor sensível entre a superfície-atmosfera e G é o fluxo de calor no solo (ALLEN et al., 2002; ELHADDAD e GARCIA, 2008).

De acordo com Gentine et al. (2007), a fração evaporativa (Λ) é dada pela razão entre o fluxo de calor latente e a energia disponível na superfície da terra, sendo praticamente constante durante o dia em condições climáticas de equilíbrio, que é conhecido como autoconservação diurna. Isto é, Λ permanece estável ao longo do período diurno, sem cobertura de nuvens ou até mesmo com cobertura relativamente constante; descrita pela equação abaixo:

$$\Lambda = \frac{LE}{R_n - G} = \frac{LE}{LE + H} \quad (02)$$

A Λ ao meio-dia é equivalente a um valor médio desta, ou seja, tornando-se estatisticamente representativa do período diurno. Como as medições de evaporação não estão sempre disponíveis no decorso do dia, e dadas à sua característica de autoconservação, esta apresenta duas particularidades: 1) estabilidade durante o período diurno; 2) ao meio-dia a Λ (valor instantâneo) traduz valores diários, evidenciando a possibilidade de aplicação em SR com respeito ao balanço de energia à superfície (SHUTTLEWORTH et al., 1989; SUGITA e BRUTSAERT, 1991; BRUTSAERT e SUGITA, 1992; CRAGO & BRUTSAERT, 1996; JIA et al., 2013)

Com relação à fração evaporativa são utilizadas duas considerações acerca do balanço de energia em casos limitantes. Sob a condição de limite-seco, o calor latente liberado pela evaporação tende a zero devido à limitação de umidade do solo e o fluxo de calor sensível estar no seu valor máximo. E na condição de limite-úmido, onde a taxa de liberação de calor latente da evaporação é máxima, isto é, a evaporação é limitada

apenas pela energia disponível de uma superfície específica e das condições atmosféricas, logo o fluxo de calor sensível tem o seu valor mínimo (SU, 2002).

3.2 Evapotranspiração: Conceitos e Relevância

A evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, sendo um fenômeno de fundamental importância para a manutenção da vida no planeta. Quase todo o volume de água transferido dos continentes para a atmosfera são atribuídos a evapotranspiração, que é relacionada à liberação de calor latente (*LE*). O seu valor integrado no tempo é importante para diferentes aplicações em estudos hidrológicos, agrônômicos e de modelagem atmosférica (BASTIAANSEN et al., 1998a; BEZERRA, 2006; SANTOS, 2009).

É caracterizada por processos pelos quais a água na fase sólida ou líquida, próxima ou na superfície terrestre, se transforma em vapor de água atmosférico, resultado da combinação de dois fenômenos, através dos quais, a água é perdida pela superfície por evaporação ou por transpiração. Allen et al. (1998) afirma, é o processo por meio do qual a água é convertida da fase líquida para a fase de vapor (vaporização), removendo-a de superfícies evaporantes como, oceanos, lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação úmida (evaporação do orvalho e da chuva interceptada pela copa das árvores). Já a transpiração é a água transferida ou perdida pela vegetação para a atmosfera, a partir de pequenos orifícios (estômatos) da superfície das folhas, ou através de pequenas perdas pelas lenticelas no caso das plantas lenhosas (DINGMAN, 2002; PEREIRA et al., 2002; BEZERRA, 2006; SANTOS, 2009).

O termo evapotranspiração foi sugerido por Thornthwaith (1944) para representando a evaporação e a transpiração, que ocorrem de maneira natural e simultânea, em uma superfície vegetada (PEREIRA et al., 2002; BEZERRA, 2006).

De acordo com Allen et al. (1998) e Pereira et al. (2002) a evapotranspiração é amplamente relacionada à fatores combinados ou não da vegetação, manejo do solo e gestão das condições ambientais, sobretudo pela radiação solar, temperatura da superfície, temperatura e umidade relativa do ar e o vento (SANTOS, 2009).

Estimativas da evapotranspiração são muito importantes para estudo climáticos, hidrológicos, previsão do tempo, monitoramento ecológico e manejo de recursos hídricos. Áreas agrícolas inseridas em regiões semiáridas, em que o ciclo hidrológico é fortemente influenciado pela evapotranspiração, estimar precisamente a evapotranspiração é de suma importância para a economia de água por meio de práticas eficientes de irrigação. Assim, estudos realizados no Sul do Mediterrâneo para avaliar a variabilidade espaço-temporal das necessidades hídricas das culturas irrigadas sem limitações hídricas, e através destes desenvolve-se ferramentas de gestão eficientes de irrigação em zonas áridas e semiáridas (HOEDJES et al., 2008).

3.2 Evapotranspiração de Referência (ET_0)

Uma superfície de referência é definida como uma cultura hipotética, com cobertura vegetal de altura de 12 cm, resistência estomática constante de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23. Sendo a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, bem suprida de água, é chamada de evapotranspiração de referência (ET_0). A superfície de referência é uma suposta cultura de grama verde, de solo sombreado e sem escassez de água. O parâmetro ET_0 , representa o “potencial” de evaporação da atmosfera num certo

local e período, sem considerar as características da cultura e fatores do solo (ALLEN et al., 1998). Dada por:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (03)$$

em que ET_0 é expresso mm d^{-1} ; R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G é o fluxo vertical de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); Δ é a tangente à curva de pressão de vapor ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); U_2 é a velocidade do vento a 2m do solo (m s^{-1}); T é temperatura média diária do ar a 2m do solo ($^\circ\text{C}$); e_s é a pressão de saturação do vapor (kPa); e_a é a pressão real do vapor (kPa); $e_s - e_a$ déficit da pressão de saturação do vapor (kPa); γ é a constante psicométrica ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$).

3.3 Coeficientes de Cultivo (k_c)

O coeficiente de cultivo (k_c) foi determinado a partir dos valores obtidos da evapotranspiração da cultura (ET_c) e da evapotranspiração de referência (ET_0). Variando de acordo com o estágio fenológico da cultura, podendo atingir, por exemplo, valor superior à unidade na fase reprodutiva de muitas culturas. Ou seja, cada tipo de cultura têm diferentes k_c , refletindo no uso da água (BARROSO, 2010; EMBRAPA, 2013a; BRITISH COLUMBIA, 2013).

$$k_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (04)$$

3.2 O algoritmo SEBAL – *Surface Energy Balance Algorithm for Land*

O SEBAL é um método que fornece estimativas dos componentes do *BE*, consequentemente da evapotranspiração, baseado em combinações de relações empíricas e parametrizações físicas (BASTIAANSEN et al., 1998a; b). Este foi desenvolvido por Bastiaanssen (1995), na Holanda. Durante sua aplicação são necessárias as radiâncias espectrais registrados em sensores de satélites e de um conjunto mínimo de dados meteorológicos de superfície, tais como a velocidade do vento e a temperatura do ar para resolver o balanço de energia à superfície da terra. Os principais produtos gerados são: a obtenção do albedo da superfície, as emissividades e índices de vegetação, temperatura da superfície, saldo de radiação, fluxos de calor no solo, calor sensível e latente, além da evapotranspiração real (consumo de água) (COURAULT et al. 2002; BEZERRA, 2006; SANTOS, 2009).

Através de sua aplicação, permite-se de determinar a variabilidade espacial da evapotranspiração internamente e entre campos irrigados, mesmo quando aplicado a imagens de satélites com alta resolução espacial. O que é uma informação valiosa, pois, possibilitando alcançar grande eficiência no emprego de irrigação, especialmente em regiões onde os recursos hídricos são limitados ou caros, como em regiões áridas e semiáridas (BEZERRA, 2006; SANTOS, 2009).

O modelo em questão utiliza como dados de entrada, as radiâncias espectrais do visível, infravermelho próximo e do infravermelho termal de áreas com um contraste hidrológico suficientemente grande (tipos de solos, secos ou irrigados, sem essencialmente ter cobertura vegetativa). Composto uma das inúmeras etapas computacionais do processamento de imagens para obter trocas de energia entre a superfície e a atmosfera, e também a evapotranspiração (BASTIAANSEN et al., 1998a)

As etapas processadas no cálculo do R_n , o SEBAL utiliza a temperatura da superfície (T_s), reflectância espectral e hemisférica da superfície ($\rho\lambda$), índices de vegetação (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada- IVDN, Índice de Vegetação Ajustado ao Solo- IVAS, Índice de Área Foliar - IAF), além de suas inter-relações para estimar os fluxos de energia à superfície e inferir sobre os diversos tipos de superfícies da região de estudo. Sendo que, o algoritmo faz estimativas de ET_a partir do fluxo de LE , calculado como resíduo do BE (BASTIAANSEN et al., 1998a; WELIGEPOLAGE, 2005; SANTOS, 2009).

Estudos conduzidos por Allen et al. (2002) em Idaho – EUA, nos anos de 1985 e 1989, comparando a evapotranspiração obtida pelo SEBAL com as medidas lisimétricas, estes apresentaram uma diferença média mensal para o ano de 1985, de +/- 16% e 20% para 1989, com uma diferença sazonal de apenas 4% em 1985. Em 1989, a diferença entre SEBAL (714 mm) e as medidas lisimétricas (718 mm) foi menor que 1% para a cultura da beterraba no período de abril a setembro (SANTOS, 2009).

Na Bacia Indus, no Paquistão, o balanço hídrico de uma área irrigada de 3 milhões de hectares foi comparado com o SEBAL. A evapotranspiração real anual determinada pelo SEBAL apresentou uma diferença de 1% quando comparada aos resultados obtidos pelo balanço hídrico, evidenciando uma excelente validação na escala regional (BASTIAANSEN et al., 2002). No Sri Lanka, Bastiaanssen e Chandrapala (2003) computaram o balanço hídrico em escala nacional, para o período de 1999 até 2000, verificaram diferenças entre o SEBAL e o balanço hídrico de 1 e 11% para Kelani e Gin Ganga, respectivamente (SANTOS, 2009).

Jia et al. (2013), combinou dados meteorológicos com dados do SEBAL estimados a partir de produtos MODIS do satélite Terra, sobre a planície alagada de Sanjiang no nordeste da China. Os fluxos instantâneos de R_n , G ,

As estimadas pelo SEBAL apresentaram coeficientes de determinação de 0,87, 0,69, 0,95 e 0,92, respectivamente, quando comparados aos obtidos por correlações turbulentas. A evapotranspiração obtida pelo SEBAL produziu erros de -11,29% a 27,57% em comparação com o calculado por técnicas de correlações turbulentas (10,52% em média). Os resultados de validação mostram que a evapotranspiração calculada via SEBAL é comparável às observações em campo, com desvio de 8,86%.

O SEBAL tem sido aplicado no Brasil, em vários estudos sobre a área do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho, localizado nos sertões dos estados da Bahia e Pernambuco, à margem do Rio São Francisco em torno das cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA (LOPES, 2003; BEZERRA, 2004; DI PACE, 2004; FEITOSA, 2005; SILVA E BEZERRA, 2006; TEIXEIRA et al., 2008; TEIXEIRA et al., 2009a,b), Chapada do Araripe no estado do Ceará (BEZERRA et al., 2008), Quixeré – CE (SANTOS, 2009), Apodi – RN (BRANDÃO et al., 2011), Norte Fluminense – RJ (MENDONÇA et al., 2012), dentre outros.

Devido à grande aplicabilidade do SEBAL em diferentes climas e ecossistemas, indicando a eficiência do modelo, este pode ser aplicado e implementado para solucionar problemas relacionados a recursos hídricos e irrigação. O SEBAL pode ser utilizado em variados propósitos: (1) no uso do solo e no manejo de água em bacias hidrográficas; (2) em estudos de impacto e conservação de recursos hídricos; (3) na análise do desempenho de sistemas de irrigação; (4) na modelagem hidrológica; (5) no sistema de monitoramento de degradação da vegetação nativa; (6) na vitalidade das florestas e (7) na avaliação da produtividade hídrica da cultura, dentre outras aplicações (BASTIAANSEN et al., 2005; SANTOS, 2009).

3.4O algoritmo S-SEBI – *Simplified Surface Energy Balance Index*

O S-SEBI, apresenta uma metodologia simplificada, para obtenção dos fluxos do BE através de medidas por sensoriamento remoto, oferecendo maior operacionalidade em relação às demais metodologias. Foi validado na Itália (ROERINK et al., 2000), na Espanha (GÓMEZ et al., 2005; SOBRINO et al., 2005), na Holanda (WELIGEPOLAGE, 2005) e na Península Ibérica (SOBRINO et al., 2007). Aplicou-se também no semiárido do Nordeste do Brasil (SANTOS et al., 2007, 2010; SANTOS e SILVA, 2008, 2010).

Os cálculos dos fluxos H e LE são feitos a partir da fração evaporativa, que, por sua vez, é obtida com base no albedo (α) e na temperatura da superfície (T_s), pixel a pixel (ROERINK et al., 2000; SANTOS e SILVA, 2008; SANTOS e SILVA, 2010). Onde a temperatura máxima está relacionada às condições de solo seco e a temperatura mínima para condições de solo úmido (ROERINK et al., 2000). Isto é, devem existir na cena (imagem de satélite analisada) pixels secos e úmidos, contendo contraste hidrológico.

As condições limitantes do modelo são obtidas do gráfico de dispersão de T_s e α , como mostrado na Figura 1. No caso do limite úmido, que são as áreas saturadas de água ou superfícies irrigadas, onde toda a energia disponível é utilizada para evapotranspiração, isto é, LE é máximo ($\Lambda \approx 1$). E, no caso de limite seco, em que a umidade é tão baixa que não haverá a evaporação, e toda a energia disponível é dissipada na forma de fluxo de calor sensível, H é máximo ($\Lambda \approx 0$) (GARCÍA et al., 2007).

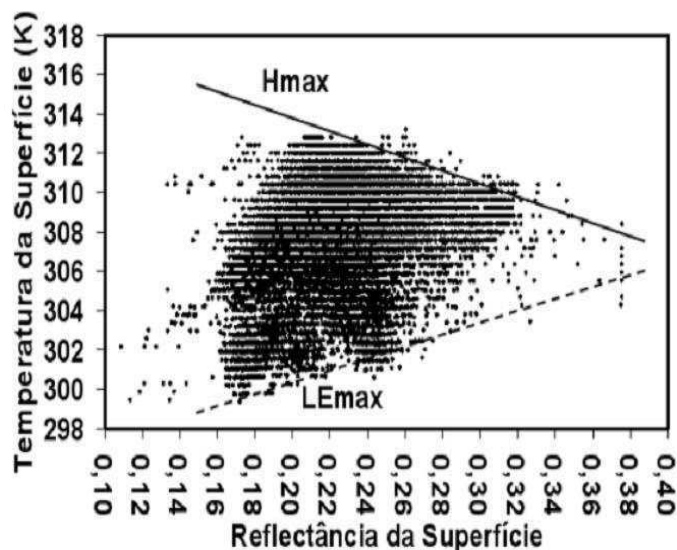


Figura 7- Representação esquemática do gráfico de dispersão de temperatura da superfície e reflectância da superfície (albedo) (Fonte: SANTOS e SILVA, 2010).

Quando a temperatura da superfície (T_s) é aproximadamente constante para valores baixos de albedo, situação que está relacionada às superfícies saturadas de água, tais como lagos e áreas irrigadas, em que toda energia disponível é utilizada para o processo de evapotranspiração. Um acréscimo na T_s e um aumento da reflectância da superfície (albedo), devido à umidade do solo estar reduzida e produzir diminuição da evapotranspiração; que é característica denominada de “evaporação controlada” (Figura 2). Em certo ponto, a T_s é reduzida para maiores valores de albedo, visto que a umidade do solo é menor e a evaporação não ocorre, pois toda a energia disponível é utilizada para o aquecimento da superfície. Deste modo, um aumento do albedo produz uma diminuição do saldo de radiação, e produzindo o aquecimento da superfície inferior; situação conhecida como “radiação controlada” (ROERINK et al., 2000; GÓMEZ et al., 2005; SOBRINO et al., 2005).

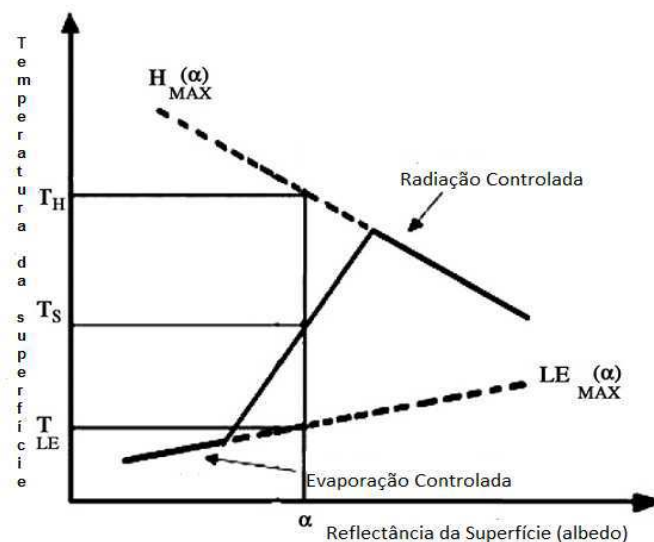


Figura 8- A temperatura da superfície versus albedo da superfície, H é o fluxo de calor sensível, LE é o fluxo de calor latente e α é o albedo (Fonte: Figura adaptada de SOBRINO et al., 2005).

No estudo realizado por Roerink et al. (2000), numa região de Toscana (Piano Di Rosia) da Itália, mostraram que os fluxos de calor estimados apresentaram concordância com os valores medidos, mas os fluxos de calor calculados pelo S-SEBI foram maiores que os medidos. O método apresentou uma precisão de aproximadamente 10%, quando comparado aos dados medidos pelas técnicas da razão de Bowen, correlações turbulentas e cintilometria (SANTOS, 2009).

Em Albacete – Espanha, um estudo empregado por Sobrino et al. (2005), em 5 parcelas contendo diferentes culturas (alfafa, milho e cevada), observou-se para a ETA diária erro inferior a 1 mm dia/dia. Gómez et al. (2005) aplicaram o algoritmo em uma região agrícola do Mediterrâneo, para as culturas de milho, alfafa, trigo e girassol, encontraram também um erro inferior a 1 mm/dia (SANTOS, 2009).

Santos e Silva (2010) observaram erros para os fluxos de energia obtidos para cultura da bananeira (*Musasp.*) na região de Quixeré – CE, de 2,9% para Rn , 10,5% para

G , 31,9% para H e 6,4% para LE . Resultados que estão de acordo com os obtidos por Roerink et al. (2000), Weligepolage (2005), Fan et al. (2007) e García et al. (2007). O método também foi aplicado para uma cultura de algodão no estado do Ceará, onde o S-SEBI exibiu forte correlação com o SEBAL, de 0,85, para 5% de significância estatística (SANTOS et al, 2010).

O algoritmo em questão apresenta desvantagem, pois as cenas analisadas devem conter valores extremos de temperatura da superfície. Segundo Sobrino et al. (2005), outras metodologias, como o SEBAL, mostram resultados melhores na determinação da ET diária, porém esta necessita de determinação de parâmetros difíceis de serem obtidos (Bastiaanssen et al., 1998a,b).

3.5 O algoritmo SSEB – *Simplified Surface Energy Balance*

O modelo SSEB, representa uma versão simplificada que mantém as principais premissas do SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) e do METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration*), modelos de balanço de energia para estimar a ETa . Ambas as abordagens assumem que a diferença entre a temperatura da superfície (T_s) e a temperatura do ar próxima ao solo, varia linearmente com respeito à temperatura da superfície, suposição esta baseada no conceito de “pixels âncoras”, sendo o *pixel quente* e *frio*, associado ao solo seco e exposto, e ao solo úmido com cobertura vegetal, correspondentemente. O pixel quente representa superfície com evapotranspiração nula, enquanto para o pixel frio é máxima. Assim, a ETa de pixels com valores entre o intervalo do pixel quente ($ETa = 0$) e do pixel frio ($ETa = \text{máxima}$) são linearmente proporcionais à fração de evapotranspiração (ET_f) (SENAY et al., 2007; CAI e SHARMA, 2009).

A ET está relacionada a diferenças na disponibilidade de água na condição da vegetação, se utiliza-a para ajustar a evapotranspiração de referência (ET_o) com base na temperatura da superfície do pixel (SENAY et al., 2011b). O seu cálculo não está vinculado a uma cultura de referência específica, como a evapotranspiração de referência da alfafa do modelo METRIC, mas pode ser considerada como a fração de evapotranspiração máxima (SENAY et al., 2011a).

Uma pesquisa realizada por Senay et al. (2007), verificou o desempenho do SSEB com o SEBAL e o METRIC, em campos de milho e soja, no estado de Dakota do Sul dos EUA, nos condados de Brookings e Moody, baseados em imagens Landsat para os anos de 2000 e 2001. Resultando no coeficiente de determinação (R^2) entre SSEB e METRIC variando de 0,94 – 0,99 e com SEBAL de 0,55 – 0,79 (trabalho não publicado por Swanson e Troien, 2007, comunicação pessoal). Gowda et al. (2009) avaliou a evapotranspiração obtida através do SSEB com a medida por lisímetros, a análise estatística dos resultados indicaram que o SSEB correspondeu a 84% da variabilidade dos valores medidos da evapotranspiração. Um gráfico de dispersão do trabalho de validação entre SSEB e METRIC é mostrado na Figura 3 (SENAY et al., 2007).

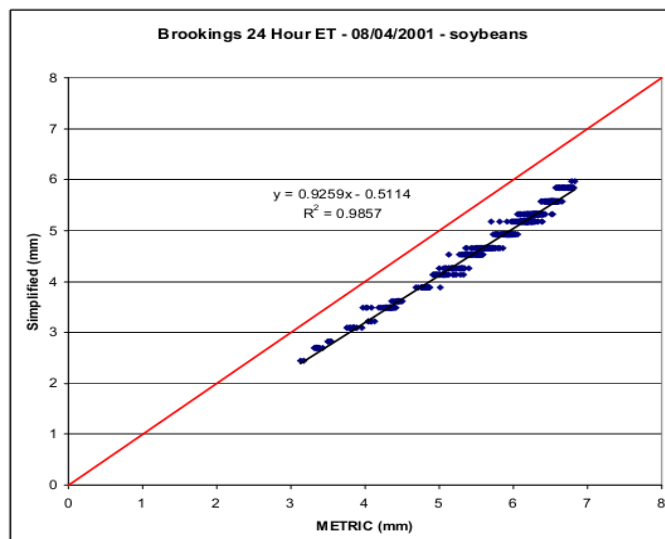


Figura 9- Gráfico de dispersão de ET_a , entre SSEB e METRIC em um campo de soja em 4 de agosto de 2001 (Fonte: SWANSON e TROOEN, 2007).

Essa abordagem necessita apenas da ET_0 obtida de variáveis meteorológicas medidas em campo, além de imagens orbitais. De acordo com a avaliação estatística dos resultados, o SSEB pode ser utilizado para estimar ET_a diária rapidamente, e em geral, seu desempenho foi comparável com outras técnicas intensivas, tais como METRIC, SEBAL, dentre outros. Por ser um método que utiliza uma quantidade mínima de dados auxiliares, possui um excelente desempenho na obtenção da ET_a diária em campos irrigados, e também apresenta um desempenho satisfatório em campos de sequeiro. Tornando-o uma ferramenta promissora para o mapeamento da ET_a em regiões áridas e semiáridas ao redor do mundo, com as características hidro-climáticas semelhantes (GOWDA et al., 2008; 2009).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área de estudo

A área estudada está localizada na fazenda Frutacor (coordenadas: 5°08'44"S, 38°05'53" W), no município de Quixeré – CE (Figura 4), na microrregião do Baixo Rio Jaguaribe, com elevação média de 147 m e área aproximada de 250 ha de cultivo de bananeiras pacovan (*Musa sp.*). A cultura em questão foi plantada em fileiras duplas, obedecendo a um espaçamento de 4 m x 2 m x 2,4 m, com sistema de irrigação por gotejamento superficial, lâmina diária de 9,5 mm, parcelada em dois pulsos – um diurno e outro noturno. O local apresenta clima semiárido seco e quente, tipo BSh, segundo a classificação de Köppen–Geiger (SAMPAIO et al., 2011), com temperatura média anual de 28,5 °C, sendo as temperaturas máxima e mínima anual de 36 °C e 22 °C, respectivamente. A precipitação média anual de 772 mm num período de 25 anos (1981 – 2006) de observações registradas no posto pluviométrico de Quixeré–CE (Figura 5), cuja distribuição média mensal está também ilustrada na Figura 5; a média anual da umidade relativa do ar é de 62%. Conforme o SIBCS (1999), estudos pedológicos identificaram os solos da região como sendo do tipo Cambissolos (SANTOS e SILVA, 2008; 2010; SANTOS, 2009).

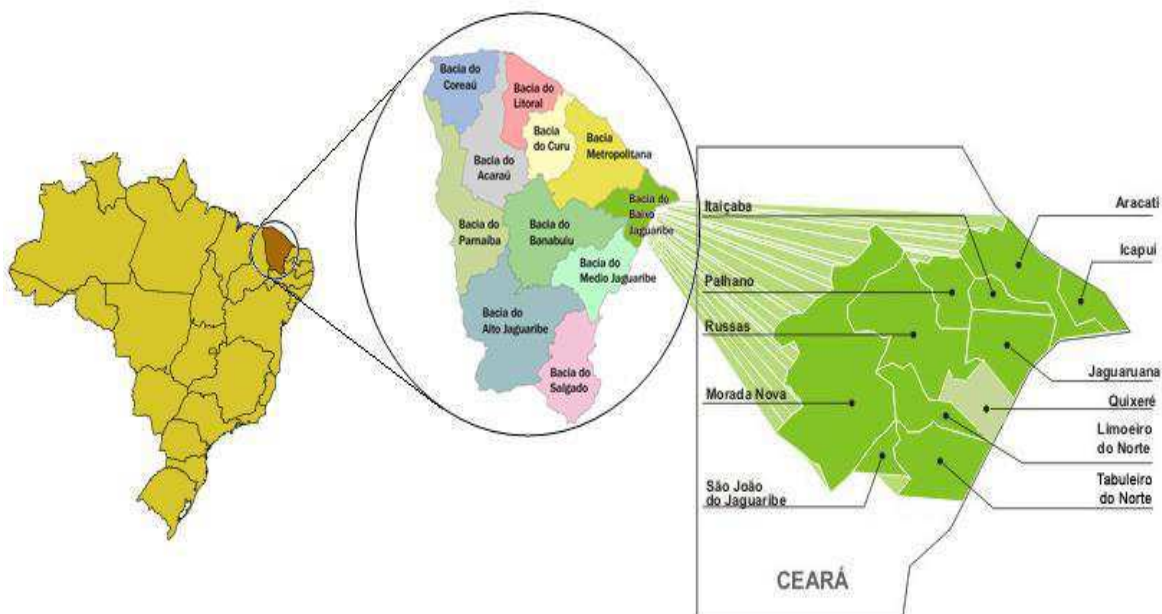


Figura 10- Mapa do Ceará com destaque para região do Baixo Jaguaribe e município de Quixeré (Fonte: SANTOS, 2009).

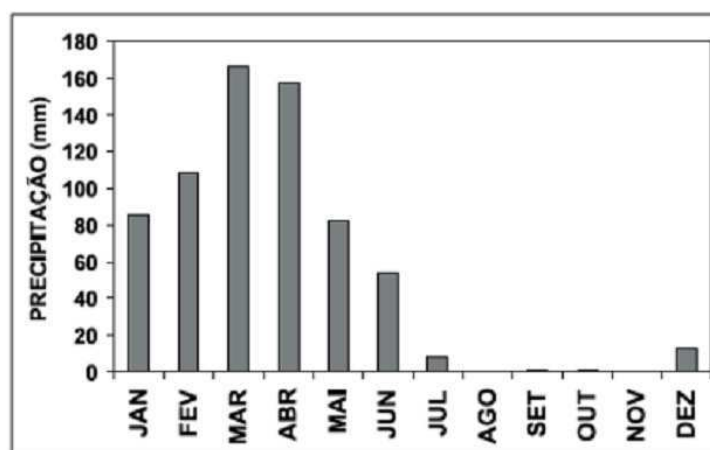


Figura 11. Distribuição das médias mensais da precipitação de 1981 a 2006. (Fonte: SANTOS e SILVA, 2008).

4.2 Dados

Para esta análise foram utilizadas imagens do sensor *ThematicMapper (TM)* a bordo do satélite Landsat 5, referente aos dias 24/10/2005 e 08/08/2006; correspondentes ao dia de ordem do ano (DOA), 297 e 220, respectivamente. Este

satélite possui resolução espacial de 30 m e 120 m nos canais reflectivos e termal respectivamente, e a órbita de interesse neste estudo é a 216, ponto 64.

Foram utilizados dados do saldo do R_n e G , gerados de medidos em campo, cujos os detalhes da campanha experimental podem ser encontrados em Santos (2009), o R_n foi medido através de um saldo radiômetro (CNR1, Kipp&Zonnen, Delf, The Netherlands), instalado a 7,0 m acima da superfície e 2,0 m acima do dossel da cultura. Os dados de G foram obtidos a partir da média das medidas de dois fluxímetros (HFP01SC-L, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT), fixados a uma profundidade de 2,0 cm, um entre plantas e a outro entre fileiras.

Também, aproveitaram-se produtos obtidos através da metodologia SEBAL a partir de Santos (2009), que serviram de parâmetros para comparação e verificação da eficiência dos métodos S-SEBI e SSEB, a partir de recortes de áreas de interesse do pomar de bananeiras, vegetação nativa (caatinga) e solo exposto. Métodos estes utilizados para estimativa do calor sensível (H), calor latente (LE), fração evaporativa (A), fração de evapotranspiração (ET_f) e evapotranspiração real diária (ET_a).

4.3 Saldo de Radiação (R_n)

Esquema das etapas do processamento das imagens Landsat 5 – TM na obtenção do R_n , utilizados em algumas etapas do desenvolvimento dos modelos SEBAL, S-SEBI, tais como albedo, os índices de vegetação, emissividades, temperatura da superfície; seguindo o fluxograma da Figura 6.

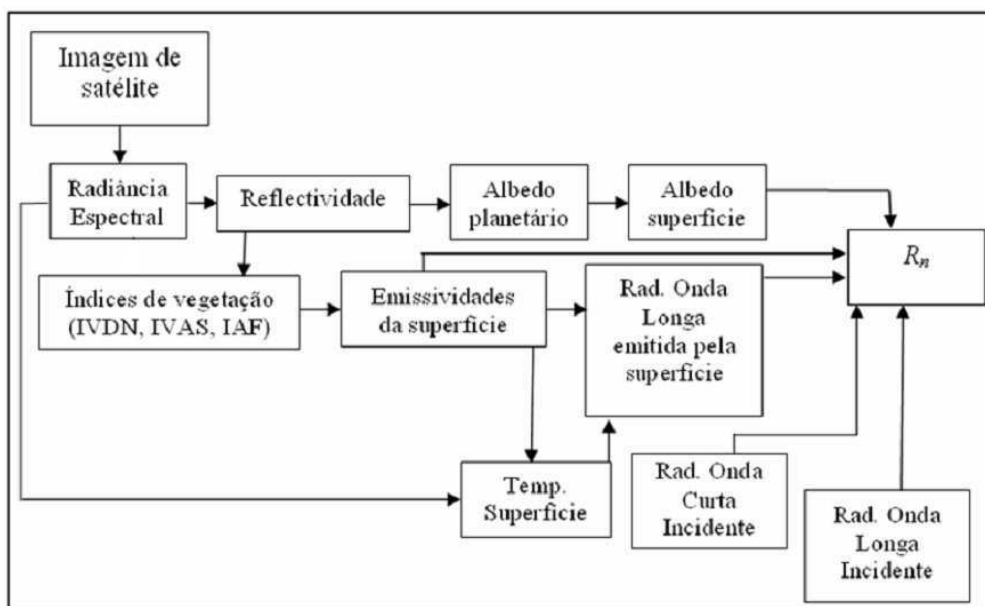


Figura 12- Fluxograma das etapas do processamento para obtenção do balanço de radiação à superfície – R_n (Fonte: SANTOS e SILVA 2010).

O primeiro passo é calcular a radiância espectral ou calibração radiométrica (L_λ), dada pela seguinte expressão:

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) DN + L_{MIN} \quad (05)$$

com DN igual ao número digital de cada pixel da imagem, L_{MAX} e L_{MIN} são as constantes de calibração espectral do sensor (Landsat 5 - TM) propostas por ChandereMarkham(2003), mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Constantes de calibração do Landsat 5-TM (Fonte: SANTOS, 2009).

Banda	$L_{MIN}(\text{Wm}^{-2}\text{st}^{-1}\mu\text{m}^{-1})$	$L_{MAX}(\text{Wm}^{-2}\text{st}^{-1}\mu\text{m}^{-1})$
1	-1,52	193,0
2	-2,84	365,0
3	-1,17	264,0
4	-1,51	221,0
5	-0,37	30,2
6	1,2378	15,303
7	-0,15	16,5

Depois, calcula-se a reflectância monocromática (ρ_λ) segundo a equação de Allen (2002):

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda}{ESUN_\lambda \cos \theta d_r} \quad (06)$$

onde d_r é a distância relativa Terra-Sol, de acordo com a equação (06) e DOA é o dia de ordem do ano (em dias julianos), que as cenas foram geradas.

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(DOA \frac{2\pi}{365}\right) \quad (07)$$

E da equação (06), L_λ é a radiância espectral, θ é o ângulo zenital do Sol e $ESUN_\lambda$ são os valores da constante solar monocromática associada a cada banda espectral, cujos valores foram retirados do artigo de ChandereMarkham(2003) e estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores do $ESUN_\lambda$ ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$) para o Landsat 5 – TM.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
Landsat 5	1957	1826	1554	1036	215,0	-	80,67

A etapa seguinte é obter o albedo no topo da atmosfera ou albedo planetário (α_{toa}) através de uma combinação linear de ρ_λ e escalares de cada banda espectral ($\bar{\omega}_\lambda$) (Allen, 2002).

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (08)$$

sendo que os coeficientes de cada reflectânciamonocromática (escalares) da equação (08) foram obtidos da seguinte maneira:

$$\bar{\omega}_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \quad (09)$$

Depois de calculado o albedo planetário é necessário estimar o albedo da superfície (α) corrigido dos efeitos da atmosfera, como indicado pelo manual de Allen et al. (2002),

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (10)$$

em que α_{toa} é o albedo no topo da atmosfera, $\alpha_{path_radiance}$ é referente a parte da radiação refletida pela atmosfera e recomenda-se o valor de 0,03 baseado em Bastiaanssen (2000). A transmissividade (τ_{sw}) em função de z —elevação em relação ao nível do mar, representa os efeitos da absorção e reflexão incluindo a radiação solar direta e difusa (dispersa) na superfície (Allen et al., 2002).

Na etapa posterior ao albedo de superfície deve-se calcular o Índice de *IVDN* e o Índice de vegetação ajustado ao solo (*IVAS*) em que ambos são escritos em relação às reflectâncias do infravermelho próximo (ρ_4) e do vermelho (ρ_3), como as equações mostradas abaixo, por Allen et al. (2002):

$$IVDN = (\rho_4 - \rho_3) / (\rho_4 + \rho_3) \quad (11)$$

$$IVAS = (1 + F)(\rho_4 - \rho_3) / (F + \rho_4 + \rho_3) \quad (12)$$

em que F é uma constante (igual a 0,5) que está relacionada a características do solo. E, para encontrar o Índice de Área Foliar (IAF) que é dado pela equação empírica descrita em Allen et al. (2002):

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - IVAS}{0,59}\right)}{0,91} \quad (13)$$

As emissividades da banda termal (ε_{NB}) e da banda larga (ε_0) - onda longa emitida pela superfície. Se o $IVDN > 0$ e o $IAF < 3$ são aplicadas as seguintes equações:

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331IAF \quad (14)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01IAF \quad (15)$$

mas, se o $IAF \geq 3$, então $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_0 = 0,98$. Em caso de corpos d'água onde $IVDN < 0$, tem-se $\varepsilon_{NB} = 0,99$ e $\varepsilon_0 = 0,985$ (Allen et al., 2002).

Em seguida é preciso encontrar a temperatura de superfície (T_s), dada pela equação de Planck modificada em função da radiância espectral da banda termal ($L_{\lambda 6}$) e de ε_{NB} ,

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB}K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (16)$$

com $K_1 = 607,8$ e $K_2 = 1261$ estão em $mW/cm^2/sr/\mu m$ constantes usadas para o sensor TM do Landsat 5 (Allen et al., 2002).

O próximo passo é obter as radiações de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$), onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$), radiação de onda curta incidente ($R_{C\downarrow}$) e por fim R_n , seguindo o roteiro fornecido por Allen et al. (2002). A $R_{L\uparrow}$ é feita pela equação de Stefan-Boltzmann, em função da T_s , ε_0 e da constante de Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (17)$$

O termo seguinte é $R_{L\downarrow}$, proporcionada pela equação de Stefan-Boltzmann em função da emissividade do ar (ε_a), temperatura do ar (T_a) que é proveniente da estação meteorológica,

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (18)$$

sendo ε_a representado pela seguinte fórmula:

$$\varepsilon_a = 0,85(-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (19)$$

A penúltima etapa para encontrar o R_n é obter a $R_{C\downarrow}$ pela equação com respeito a constante solar $G_{sc} = 1367 \text{ W m}^{-2}$ e outros fatores já mencionados anteriormente,

$$R_{s\downarrow} = G_{sc} \cos \theta \tau_r \tau_{sw} \quad (20)$$

E, por fim, se faz o compito das grandezas albedo, emissividade e das radiações descritas acima, para encontrar o saldo R_n em W m^{-2} :

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (21)$$

4.4 Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

Do balanço de energia, o fluxo de calor latente (LE) é fornecido subtraindo o fluxo de calor no solo (G) e fluxo de calor sensível (H) do saldo de radiação (R_n) (BASTIAANSEN et al., 1998a; JIA et al., 2013). A obtenção do R_n se dá através do

processamento de imagens do albedo, igualmente para o G que é função do Rn e $IVDN$ (CALCAGNO et al., 2007).

A estimativa de H através da equação(22) é função da resistência aerodinâmica (r_{ah}) em s/m, que é feita com base na velocidade do vento, ΔT é a diferença de temperatura (K) do ar entre dois níveis próximos à superfície, c_p é o calor específico do ar seco à pressão constante ($1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) e ρ é a densidade do ar úmido (kg m^{-3}) (SANTOS, 2009).

$$H = \frac{\rho c_p \Delta T}{r_{ah}} \quad (22)$$

O cálculo do H , no algoritmo necessita de se selecionar dois pixels na imagem, denominados “pixels âncoras”, para se determinar a variação de temperatura (ΔT), onde um é o *pixel quente* e o outro é o *pixel frio*. A diferença de temperatura de uma superfície árida (referente ao *pixel seco*) é encontrada considerando o LE nulo, e quando toda a energia disponível ($Rn - G$) é convertida em H . Na superfície úmida (referente ao *pixel frio*), praticamente toda energia disponível é utilizada para o processo de evaporação, conseqüentemente o $H = 0$ e $\Delta T = 0$ (BASTIAANSEN et al., 1998a; 1998b; CALCAGNO et al., 2007; JIA et al., 2013).

4.5 Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI)

Conforme o próprio nome do modelo indica, este é um tipo de modelo simplificado, desenvolvido por Roerink et al. (2000) pra estimar os fluxos à superfície. É baseado no contraste entre um limite de seca e umidade da reflectância da superfície (albedo) e a temperatura da superfície no limite-seco (temperatura máxima) e no limite-

úmido (temperatura mínima); diferenciando a energia disponível para fluxos de calor sensível e latente (Zahira et al., 2009).

Para calcular os fluxos de LE e H é preciso que previamente a fração evaporativa tenha sido obtida,

$$\Lambda = \frac{T_H - T_0}{T_H - T_{LE}} \quad (23)$$

em que T_s é a temperatura da superfície, T_H e T_{LE} são as temperaturas correspondentes aos contrastes de seca e umidade para um certo valor de albedo, Ou seja, T_H está associada a $LE = 0$ (mínimo) e H é máximo e T_{LE} indica o LE máximo para H = 0 (mínimo) - como se pode verificar nas retas decrescente e crescente respectivamente do gráfico de dispersão da Figura 1 (Sobrinho et al., 2007; Zahira et al., 2009). Aplica-se a regressão linear em pontos na região das retas de $H_{máx}$ e $LE_{máx}$ para obter as equações que representam os limites máximo e mínimo,

$$T_H = a_H + b_H \alpha_0 \quad (24)$$

$$T_{LE} = a_{LE} + b_{LE} \alpha_0 \quad (25)$$

Onde a e b são os coeficientes de regressão, e substituindo (24), (25) na fração evaporativa (23):

$$\Lambda = \frac{a_H + b_H \alpha_0 - T_0}{a_H - a_{LE} + (b_H - b_{LE}) \alpha_0} \quad (26)$$

De (1) e (2) se encontram os fluxos os fluxos de LE e H em função da fração evaporativa (Zahira et al., 2009).

$$H = (1 - \Lambda)(R_n - G) \quad (27)$$

$$LE = \Lambda(R_n - G) \quad (28)$$

A densidade de fluxo de calor no solo G é calculada a partir da descrição de Bastiaanssen(2000),

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2) (1 - 0,98IVDN^4) \right] R_n \quad (29)$$

em função da T_s (°C), α , $IVDN$ e R_n .

4.6A Fração de Evapotranspiração de referência horária (ET_{rf_h}) e a Evapotranspiração Real diária (ET_a)

A ET_a determinada a partir dos algoritmos SEBAL e S-SEBI é obtida da evapotranspiração real horária (ET_h) (mm/h), que é fornecida através da densidade de fluxo de calor latente LE ,

$$ET_h = 3600 LE/L \quad (30)$$

Sendo L é o calor latente de vaporização da água ($L = 2,45 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$) e 3600 é o fator de conversão de valores instantâneos da imagem de LE para valores horários. A razão entre aET_h e a evapotranspiração de referência horária (ET_{0_h}) é a fração de evapotranspiração horária (ET_{rf_h}), sendo a ET_{0_h} calculada pelo método FAO/Penman-Monteith proposto por Allen et al. (1998). Considerando a ET_{rf_h} igual ao coeficiente de cultivo horária (K_{c_h}), que é a razão entre a ET_h e a evapotranspiração de referência horária (ET_{0_h}) (ALLEN et al., 2002; TREZZA, 2002; SANTOS et al., 2010). Supondo que o comportamento de K_{c_h} seja praticamente constante durante o período diurno, logo $ET_{f_h} = ET_{f_d}$, em que a ET_{f_d} é a fração de evapotranspiração de referência diária (TREZZA, 2002; BEZERRA, 2006; SANTOS e SILVA, 2008;

SANTOS, 2009; SANTOS et al., 2010). Assim, a ET_a em *mm/dia* é proporcional a evapotranspiração de referência diária (ET_{0-d}), de acordo com Allen et al. (1998). Isto é,

$$ET_a = ET_{rf-d} \cdot ET_{0-d} \quad (31)$$

4.7 Simplified Surface Energy Balance (SSEB)

Para obtençãoda ET_a , antes é necessário determinar a fração de evapotranspiração (ET_f) pelo método idealizado por Senay et al. (2007), necessita-se a escolha dos três pixels âncoras. Para indentificação dos pixels âncoras, são necessárias imagens de T_s e do *IVDN*. A imagem do *IVDN* serve como um guia para selecionar áreas de solo seco e sem cobertura vegetal para os pixels quentes, e áreas de solo bem suprido de água ou nas proximidades de corpos d'água e com cobertura vegetal densa. Assim, para um dado período, o pixel frio representa culturas bem vegetadas e bem regadas, selecionado pela combinação de valores baixos de T_s e altos valores de *IVDN*. Já o pixel quente representa vegetação de baixa densidade e solo relativamente seco, indentificado por altos valores de T_s e baixos valores de *IVDN* (SENAY et al., 2007; 2011b).

A fração de evapotranspiração (ET_f) varia de 0 a 1, e que o pixel quente está associado a *ET mínima* e o oposto para o pixel frio. Esta representa as diferenças na disponibilidade de água e na condição da vegetação na paisagem (CAI e SHARMA, 2009; SENAY et al., 2011b).

$$ET_f = \frac{(T_H - T_s)}{(T_H - T_c)} \quad (32)$$

com T_H sendo a média dos 3 pixels quentes e T_c a média dos 3 pixels frios selecionados com base nas imagens de *IVDN* e T_s , além da imagem T_s , como entrada e que foi gerada do cálculo da etapa (17) do saldo *Rn* (SENAY et al., 2007; CAI e SHARMA, 2010).

Por fim, a ET_a (mm/dia) de uma dada cena é estimada com base na ET_o (mm/dia) diária expressa pela equação FAO/Penman-Montheithde Allen et al. (1998) e na ET_f , ou seja:

$$ET_a = ET_f \cdot ET_o \quad (33)$$

Contudo, através da equação (33) percebe-se a semelhança da ET_f com o coeficiente de cultivo (K_c), ou seja que esta é numericamente igual ao K_c . O produto final deste modelo é resultado de técnicas de sensoriamento remoto, da indentificação na cena de áreas com contraste hidrológicos, juntamente com a utilização da ET_o obtida in situ (estação meteorológica).

5. RESULTADOS EDISCUSSÃO

5.1 Fluxos de energia à superfície (Rn , G , LE e H)

O saldo de radiação (Rn) e o fluxo de calor no solo (G) instantâneos à superfície estimados pelo algoritmo SEBAL são descritos nas Tabelas de 3 e 4, para a área do pomar de bananeiras (área agrícola), a partir das imagens processadas dos dias 297 de 2005 e 220 de 2006 e comparados com os dados medidos na torre micrometeorológica instalada na área de estudo.

De acordo com a Tabela 3, os erros percentuais do saldo de radiação (Rn) estimado pelo algoritmo SEBAL em relação ao observado para o pomar de bananeiras foram menores que 8%. Mostrando boa correspondência entre os valores de Rn estimados via SEBAL e os observados em campo.

Tabela 3. Erro percentual do Rn estimado em relação ao observado para o pomar.

DOA	Rn - Observado (W/m^2)	Rn - Estimado (W/m^2)	Erro (%) – Estimado/Observado
297 (2005)	621,1	658,2	6,0
220 (2006)	559,2	601,6	7,6

Na Tabela 4, o dia 297 (2005) exibiu erro inferior a 4% para G , porém no dia 297 (2006) ocorreu erro de aproximadamente 576%. Esse erro pode estar associado à queda das folhas da bananeira sobre a área onde os fluxímetros estavam instalados, levando a um sombreamento e, conseqüentemente, à redução do fluxo de calor no solo. Esse tipo de perturbação no sistema torna-se impossível de ser captado por imagens orbitais com 30 m de resolução espacial. Num estudo conduzido por Gómez et al. (2005), encontrou-se erro quadrático médio e o erro percentual para Rn e G , de $40 W/m^2$ (7%) e $48 W/m^2$ (40%), respectivamente, para uma área experimental do Alpilles perto de Avignon (sudeste da França), em campos de milho, alfafa, trigo e girassol.

Tabela 4. Erro percentual do G estimado em relação ao observado para o pomar.

DOA	G - Observado (W/m^2)	G -Estimado (W/m^2)	Erro (%) - Observado/Estimado
297 (2005)	89,2	86,1	3,4
220 (2006)	9,3	63,0	575,8

Os fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H) calculados segundo as metodologias S-SEBI e SEBAL foram organizados de acordo com a Tabela 5, exibiram erros inferiores a 10% para o calor latente, enquanto o calor sensível exibiu valores superiores a 25%, indicando a discrepância entre os valores estimados pelo S-SEBI com relação ao SEBAL para pomar de bananeiras. Discrepâncias que podem estar associadas às diferenças nas metodologias de obtenção dos fluxos LE e H dos algoritmos S-SEBI e SEBAL.

Tabela 5. Erros percentuais de LE e H do S-SEBI para o pomar de bananeiras em comparação ao SEBAL.

DOA	LE (W/m^2)		Erro (%)	H (W/m^2)		Erro (%)
	SEBAL	S-SEBI	S-SEBI/SEBAL	SEBAL	S-SEBI	S-SEBI/SEBAL
297 (2005)	484,7	437,1	9,8	87,3	135,0	54,6
220 (2006)	402,3	439,0	9,1	136,3	99,6	26,9

Na área de caatinga, Tabela 6, para o LE os erros entre as metodologias S-SEBI/SEBAL ocorreram valores menores que 13%, e para o H os erros ficaram inferiores a 11%. Representando que ocorre pouca distinção entre o S-SEBI e o SEBAL para o recorte da área de caatinga.

Tabela 6. Erros percentuais de LE e H do S-SEBI para a caatinga em comparação ao SEBAL.

DOA	LE (W/m^2)		Erro (%)	H (W/m^2)		Erro (%)
	SEBAL	S-SEBI	S-SEBI/SEBAL	SEBAL	S-SEBI	S-SEBI/SEBAL
297 (2005)	245,4	215,7	12,1	272,6	302,3	10,9
220 (2006)	467,6	475,8	1,8	87,4	79,2	9,4

A Tabela 7 mostra valores muito grandes de erro para o LE nos dois dias analisados, maiores que 35%. E, alta variabilidade entre os erros do fluxo de H , inferior a 7% e superior a 20%. Essas distinções mostram a ineficiência do algoritmo S-SEBI para determinar os fluxos em condições de solos exposto.

Tabela 7. Erros percentuais de LE e H do S-SEBI para o solo exposto em comparação ao SEBAL.

DOA	LE (W/m^2)		Erro (%)	H (W/m^2)		Erro (%)
	SEBAL	S-SEBI	S-SEBI/SEBAL	SEBAL	S-SEBI	S-SEBI/SEBAL
297 (2005)	59,4	86,9	46,3	399,5	372,0	6,9
220 (2006)	230,6	314,8	36,5	284,4	200,3	29,6

Zahira et al. (2009) encontrou intervalos de LE entre 400–300 W/m^2 para floresta perenifólia, campos de vegetação esparsa de 250–200 W/m^2 , e solo descoberto com valores menores, o que comparado as áreas de caatinga (vegetação esparsa) e solo exposto analisados nas Tabelas 6 e 7 está em concordância com os valores encontrados no dia 297 de 2005.

As discrepâncias observadas nas comparações de LE e H , principalmente de H , das Tabelas 5 e 7, podem estar relacionadas ao maior refinamento do método SEBAL em comparação ao S-SEBI, que conforme a própria denominação é uma metodologia simplificada para obtenção destes fluxos. No algoritmo S-SEBI, os fluxos não são calculados como parâmetros separados, como no SEBAL, mas através da fração evaporativa (A), que por sua vez é parametrizada por meio de cada imagem. No SEBAL, H é obtido através de processo iterativo, para indentificar a condição de estabilidade da atmosfera, permitindo correções nos valores da resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah} , s/m), que está em função de H . (SOBRINO et al., 2005; WELIGEPOLAGE, 2005; SANTOS, 2009; SANTOS et al., 2010; MENDONÇA et al., 2012).

5.2 Fração Evaporativa (A) e fração de evapotranspiração (ET_f)

Dos produtos derivados de sensoriamento remoto orbital, IVDN, fração evaporativa (A) e fração de evapotranspiração (ET_f) calculados segundo a metodologia do SEBAL, S-SEBI e SSEB, plotaram-se gráficos de dispersão com suas respectivas equações lineares e coeficientes de determinação, a partir de recortes de áreas de interesse contendo solo vegetado (caatinga e agricultura) e solo nu, conjuntamente.

Wang et al.(2006) observaram um aumento geral na fração evaporativa (A) com o IVDN, em 11 locais das Grandes Planícies Sul dos Estados Unidos (YEBRAA et al., 2013). Conforme a Figura 7 observou-se em geral essa mesma característica de comportamento crescente das variáveis IVDN e fração evaporativa (A) obtida via algoritmo SEBAL.

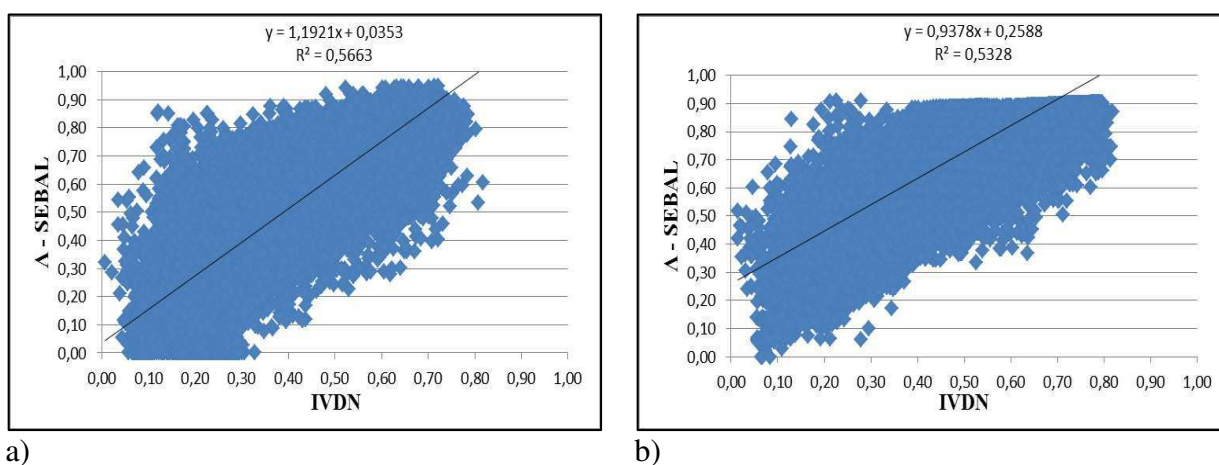
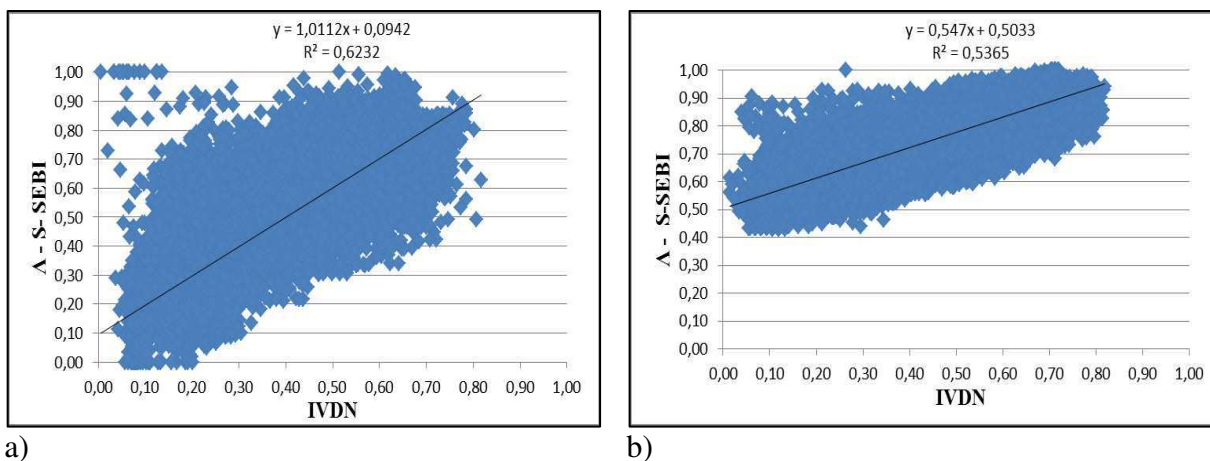


Figura 7. Correlação entre o IVDN e a fração evaporativa (A) calculada através do algoritmo SEBAL de imagens dos dias 29/7/2005 (a) e 22/02/2006 (b).

A Figura 8 apresentou a tendência de valores altos de IVDN e A , com os coeficientes de correlações (r) superiores a 0,70, sendo que o coeficiente de determinação (R^2) da Figura 8b foi aproximadamente 9% menor que o do gráfico da Figura 8a, porém, ambas as dispersões conseguiram explicar mais de 50% da variação dos modelos.

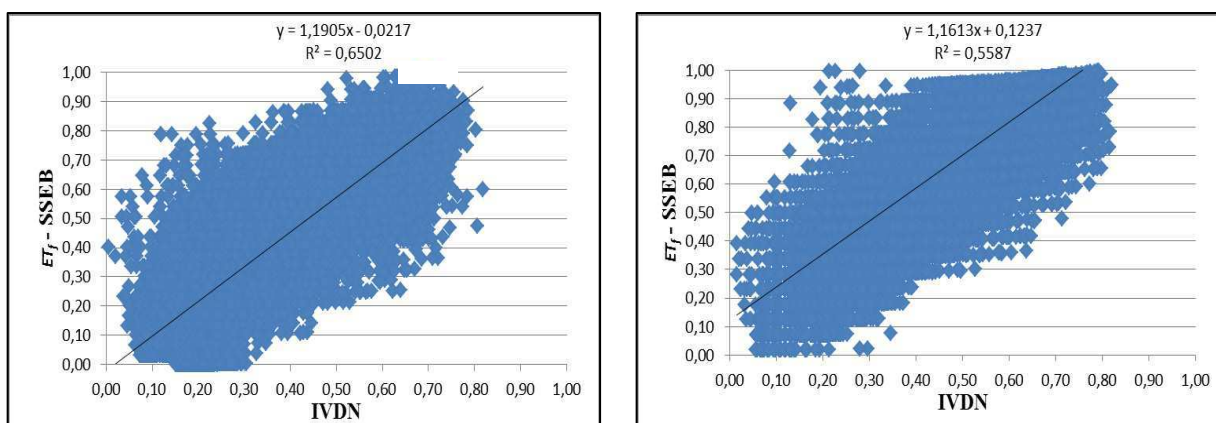


a)

b)

Figura 8. Correlação entre o IVDN e a fração evaporativa (A) calculada através do algoritmo S-SEBI de imagens dos dias 297/2005 (a) e 220/2006 (b).

Foi possível verificar na Figura 9 o mesmo comportamento crescente semelhante aos das Figuras 7 e 8. A Figura 9a, o r foi de aproximadamente 0,81 e na Figura 9b de 0,75, com coeficientes de determinação superior a 50%, ou seja, mais da metade dos modelos podem ser preditos. Observou-se também, na Figura 9b, que ocorreram valores de A maiores que 0,80 para IVDN abaixo de 0,30, o que pode ser atribuído às nuvens, reduzindo o IVDN e aumentando a A , como afirmou Senayet al. (2011a).



a)

b)

Figura 9 Correlação entre o IVDN e a fração evaporativa (ET_f) calculada através do algoritmo SSEB de imagens dos dias 297/2005 (a) e 220/2006 (b).

Conforme Platonov et al. (2008) que comparou imagens de IVDN e A gerada através do SSEB, mostraram valores de R^2 de 0,68 para abril, 0,65 para junho, 0,85 para

agosto e 0,77 para combinação das 3 imagens na região da bacia do rio Syrdarya na Ásia Central. Atribuíram-se valores mais baixos de R^2 das primeiras datas, devido à influência do solo descoberto (solo nu) na evapotranspiração, onde o processo de evaporação é dominante em oposição à transpiração. Constatação que pode ser empregada para explicar os R^2 inferiores a 0,55 das Figuras 7b e 8b.

Através de recortes das frações evaporativas (A) geradas a partir dos métodos SEBAL e S-SEBI, respectivamente, numa área dentro do pomar de bananeiras, e tomando o SEBAL como parâmetro de referência ao outro método. Disto, extraíram-se gráficos de dispersões dos dias 29/7/2005 e 22/0/2006 (Figura 10). Um estudo semelhante conduzido por Zahira et al. (2009) encontrou coeficiente de determinação de 0,61 para áreas de floresta na região ocidental da Argélia através do SEBAL e S-SEBI.

Na Figura 10a e 10b, o R^2 foi de aproximadamente 0,76 e 0,98, indicando o bom ajuste e forte correlação (principalmente para a comparação do dia 22) entre o S-SEBI em relação ao SEBAL; que é um algoritmo bastante testado e consolidado em várias partes do mundo. Verstraeten et al. (2005) verificaram variação do erro quadrado médio de 0,10 a 0,20, entre a fração evaporativa obtida pelo SEBAL e dados de torre micrometeorológica. Nota-se que nas Figuras 10a houve subestimativa, pois toda a dispersão situa-se abaixo da diagonal vermelha e na Figura 10b ocorreu superestimação, onde toda a dispersão situa-se acima da diagonal vermelha.

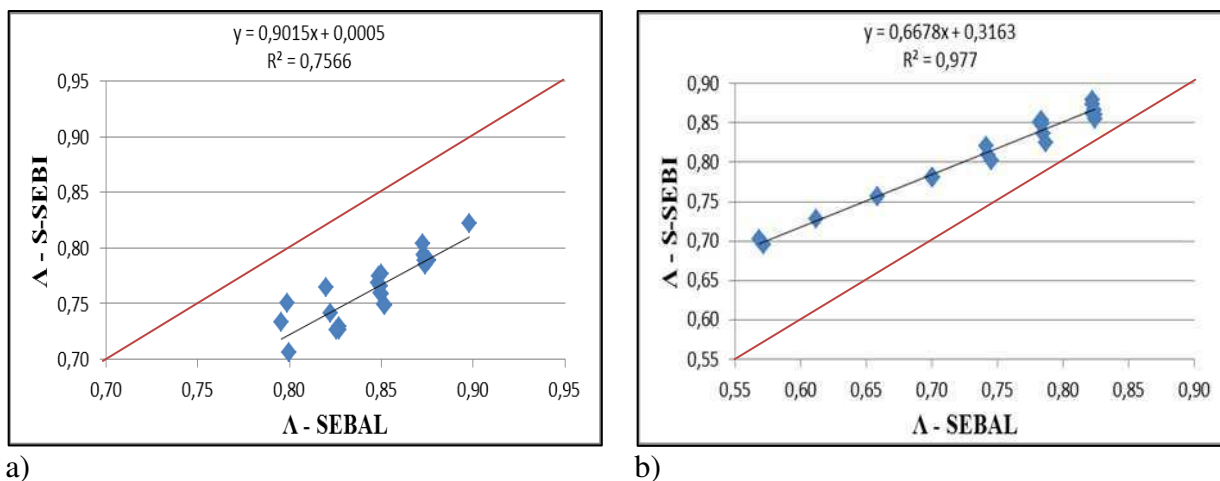


Figura 10. Correlações entre as Λ do SEBAL/S-SEBI para recortes do pomar de bananeiras nos dias 297 (a) e 220 (b).

Semelhante às correlações anteriores (Figura 10) foi feito para recortes de Λ das metodologias SEBAL e S-SEBI, na Figura 11, em uma área de solo recoberto de mata nativa, caatinga, onde se encontrou R^2 superior a 0,91 e $r \cong 0,96$, que é bastante satisfatório em termos de coerência entre os algoritmos, e menos de 8% das variações não são explicadas. Nas Figuras 11a e 11b constata-se a subestimativa e superestimativa, consecutivamente.

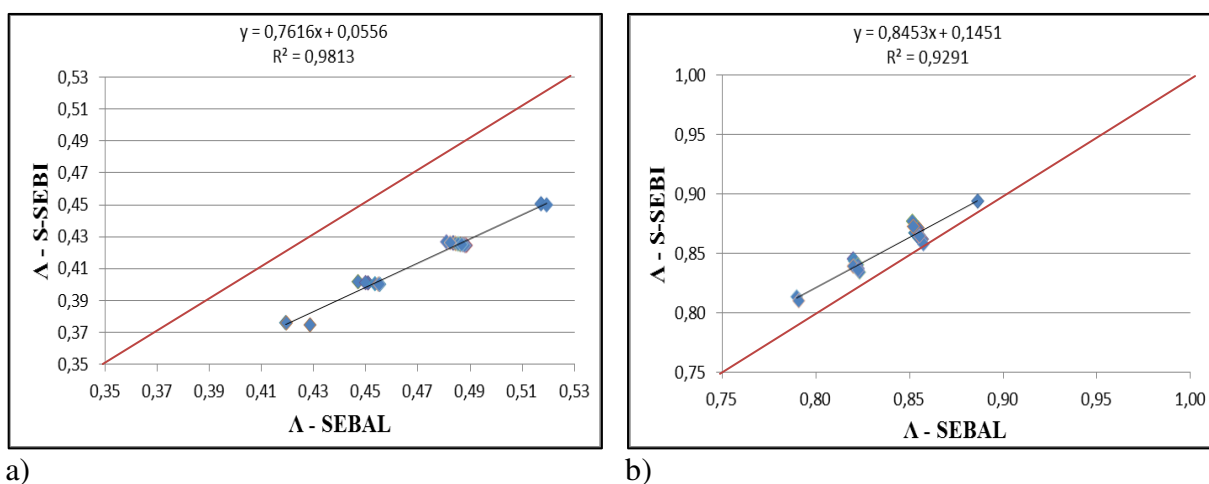


Figura 11. Correlações entre as Λ do SEBAL/S-SEBI para recortes de mata nativa (caatinga) nos dias 297 (a) e 220 (b).

A Figura 12 representa as dispersões das Λ a partir de recortes de uma área de solo exposto, ou solo nu, segundo SEBAL versus S-SEBI. Em que, o coeficiente de determinação mais baixo foi de 0,78 e a mais alta de 0,95 das Figuras 12a e b. Constatase que ambas as comparações superestimaram o S-SEBI em relação ao SEBAL, e que apresentam bom ajuste entre os modelos.

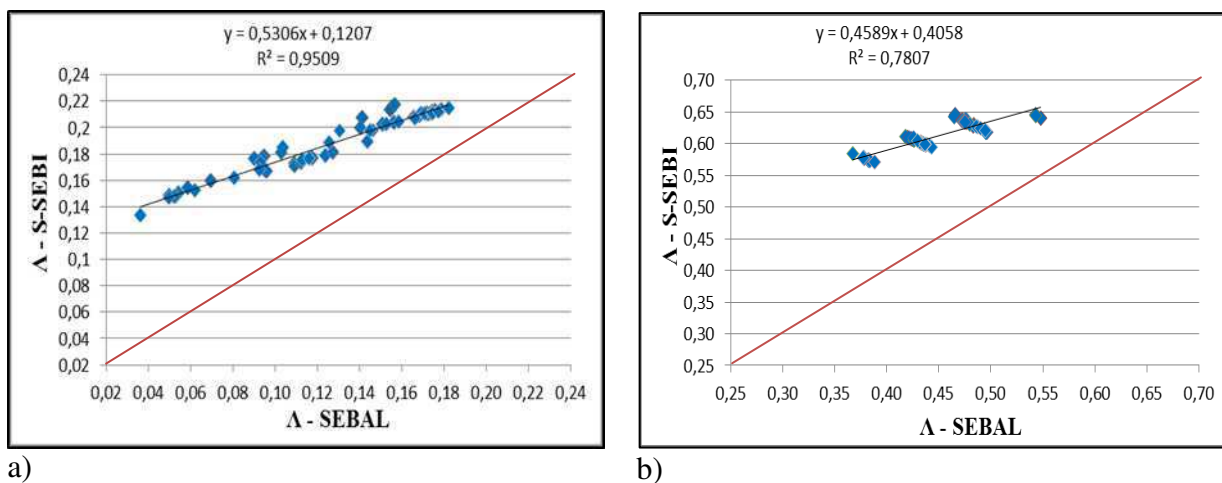


Figura 12. Correlações entre as Λ do SEBAL/S-SEBI para recortes de solo exposto nos dias 297 (a) e 220 (b).

De maneira geral, observou-se superestimação do modelo S-SEBI em comparação ao SEBAL, com exceção das correlações das Figuras 10a e 11a em que ocorreram subestimativa no dia 297/2005 para as áreas de pomar e caatinga.

A partir das frações evaporativas (Λ) estimadas via SEBAL e S-SEBI aplicou-se o teste estatístico t – Student (Anexo A) para determinar a significância dos coeficientes de correlação ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). A análise estatística foi organizada na Tabela 8, de acordo com cada área de interesse (pomar, caatinga e solo exposto), com respectivo coeficiente de correlação r calculado através da raiz quadrada do R^2 das dispersões das Figuras 10, 11 e 12. Onde, gl é o grau de liberdade, t_c é o valor crítico da tabela t – Student (Anexo B) e t_e é o valor obtido pelo teste.

Tabela 8. Estatística do teste t – Student, onde t é o valor do teste da A calculada pelo S-SEBI/SEBAL e gl (graus de liberdade), t_c (valor crítico) e t (valor do teste).

Área:	DOA	r	Gl	$\pm t_c$	t
Pomar	297	0,988	22	2,074	8,270
	220	0,998	22	2,074	30,570
Caatinga	297	0,991	28	2,048	38,332
	220	0,964	28	2,048	19,155
Solo Exposto	297	0,975	62	1,990	34,652
	220	0,884	62	1,990	14,857

Observando os valores descritos na Tabela 8, observa-se que a hipótese nula ($\rho = 0$) é rejeitada, pois os valores de t calculados recaíram sobre as duas regiões de rejeição do teste que é do tipo bicaudal. Portanto, há uma relação significativa entre as A estimadas a partir do algoritmo S-SEBI em relação ao SEBAL.

Dos dados extraídos das imagens das frações evaporativas na área do pomar de bananeiras, estimadas segundo os modelos de SR descritos anteriormente foram calculadas as médias de cada um deles e em seguida o erro percentual do algoritmo testado S-SEBI, tendo como algoritmo de referência o SEBAL; e organizados na Tabela 9. Constatou-se que os erros referentes ao S-SEBI são inferiores a 10%, evidenciando que o S-SEBI apresentou pequena discrepância com o SEBAL.

Tabela 9. Fração Evaporativa (A) estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI, para o pomar, e seus respectivos erros.

DOA	A – Pomar		Erro (%) – S-SEBI/SEBAL
	SEBAL	S-SEBI	
297/2005	0,85	0,76	9,8
220/2006	0,74	0,81	9,2

A Tabela 10 apresentou erros inferiores a 13%, isto é, não houve grande disparidade entre os valores obtidos para a fração evaporativa calculada pelo modelo S-SEBI com o SEBAL.

Tabela 10. Fração Evaporativa (λ) estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI, para a caatinga, e seus respectivos erros.

DOA	λ – Caatinga		Erro (%) – S-SEBI/SEBAL
	SEBAL	S-SEBI	
297/2005	0,47	0,42	12,1
220/2006	0,84	0,86	1,8

Da comparação do S-SEBI com o SEBAL para o solo sem cobertura vegetal na Tabela 11, notam-se as maiores distinções entre os métodos com erros superiores a 35%, que pode estar associado à ineficiência da aplicação do algoritmo S-SEBI em áreas desprovidas de cobertura vegetal e conseqüentemente com baixa umidade contida no solo.

Tabela 11. Fração Evaporativa (λ) estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI, para o solo exposto, e seus respectivos erros.

DOA	λ – Solo Exposto		Erro (%) – S-SEBI/SEBAL
	SEBAL	S-SEBI	
297/2005	0,13	0,19	46,7
220/2006	0,45	0,61	36,6

Para Zahira et al. (2009), a Λ equivalente a corpos d'água é aproximadamente 1, florestas de vegetação de densidade moderada, ocorre diminuição da fração para 0,58, mesmo no período chuvoso. E, vegetação esparsa, perene é também moderadamente seca com $\lambda = 0,4$, onde porção significativa da energia é convertida em calor sensível. Resultado do aumento da diferença de temperatura da copa e do ar, devido a maior quantidade de radiação líquida ser convertida em calor sensível, restando menos energia para o calor latente. Características encontradas nos altos valores da Λ na área de

pomar (Tabela 9) podem ser atribuídas ao fato da cultura estar bem suprida de água, dada à prática de irrigação; enquanto na área de vegetação esparsa de caatinga (Tabela 10) ocorreu a redução da A observada no dia 297.

5.3 Evapotranspiração Real Estimada (ET_a)

A ET_a foi estimada através da aplicação de metodologias de sensoriamento remoto orbital, SEBAL, S-SEBI e SSEB, sendo que o primeiro foi utilizado como referência para verificação com os outros dois.

Na Figura 13 é apresentada a distribuição espacial da ET_a para o dia 297 (24/10/2005) do produto final de cada um dos modelos já mencionados, com destaque para área do pomar de bananeiras (quadrado azul), onde, o intervalo da ET_a nos tons de verde claro e escuro mostram os maiores valores e indicando haver maior teor de humidade disponível no solo. As áreas em cor laranja apresentam valores intermediários da ET_a , denotando a presença de vegetação nativa. As cores vermelho e marrom representam áreas de solo exposto, onde a humidade é baixa.

Observa-se a maior semelhança na distribuição espacial da ET_a do algoritmo S-SEBI (Figura 13b) que o SSEB (Figura 13c), quando comparados ao SEBAL, devido a precisão mais refinada do S-SEBI para identificação das áreas com maior evapotranspiração.

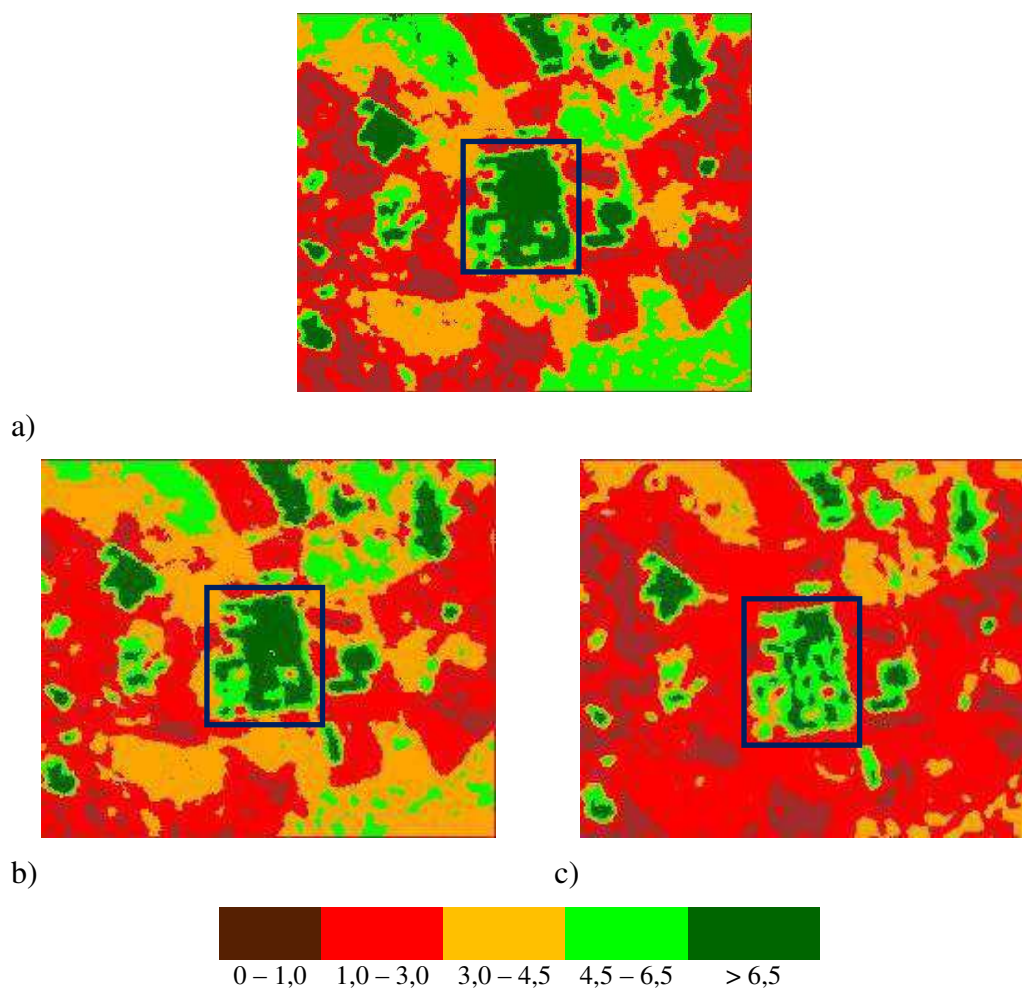


Figura 13. Distribuição espacial da ETa (mm/dia) para o dia 297 (2005) através do SEBAL (a), S-SEBI (b), SSEB (c) e sua respectiva paleta de cores.

Na Figura 14, de forma semelhante à análise anterior, mostra a distribuição espacial da ETa para o dia 220 (08/08/2006), geradas a partir dos modelos SEBAL, S-SEBI e SSEB. A ETa obtida através do S-SEBI, na Figura 14b, exibiu o comportamento mais análogo ao SEBAL que o SSEB (Figura 14c), que exibiu menor precisão para estimar a ETa . O modelo SSEB da Figura 14c, mostrou subestimar a ETa , como se verifica pela distribuição espacial apenas das cores (laranja, vermelho e marrom).

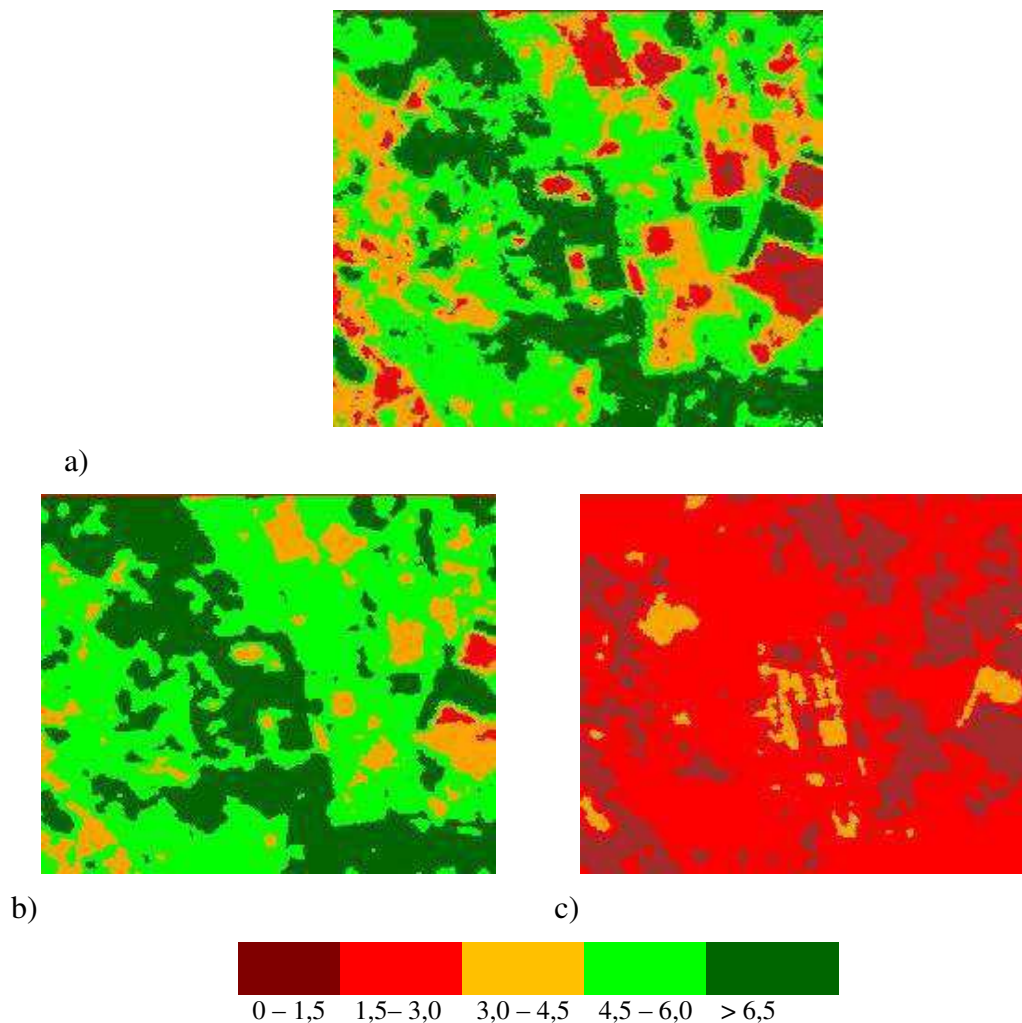


Figura 14. Distribuição espacial da ETa (mm/dia) para o dia 220 (2006) através do SEBAL (a), S-SEBI (b), SSEB (c) e suas respectivas paletas em tons de cinza.

A Figura 15 apresenta correlações para área do pomar de bananeiras dos dias 297/2005 e 220/2006, verificando a ETa dos algoritmos S-SEBI e SSEB, baseadas na estimada via SEBAL. As correlações mais baixas encontradas foram de quase 0,45 e 0,74 e os R^2 menores que 0,56 (Figura 15a e b), indicando um ajuste. Porém, as análises do dia 220, nas Figuras 15c e 15d, as correlações foram de aproximadamente 1, com R^2 superiores a 0,97. As dispersões do S-SEBI e SSEB das figuras 15a, 15b e 15d foram subestimadas com SEBAL, e na Figura 15c houve superestimação.

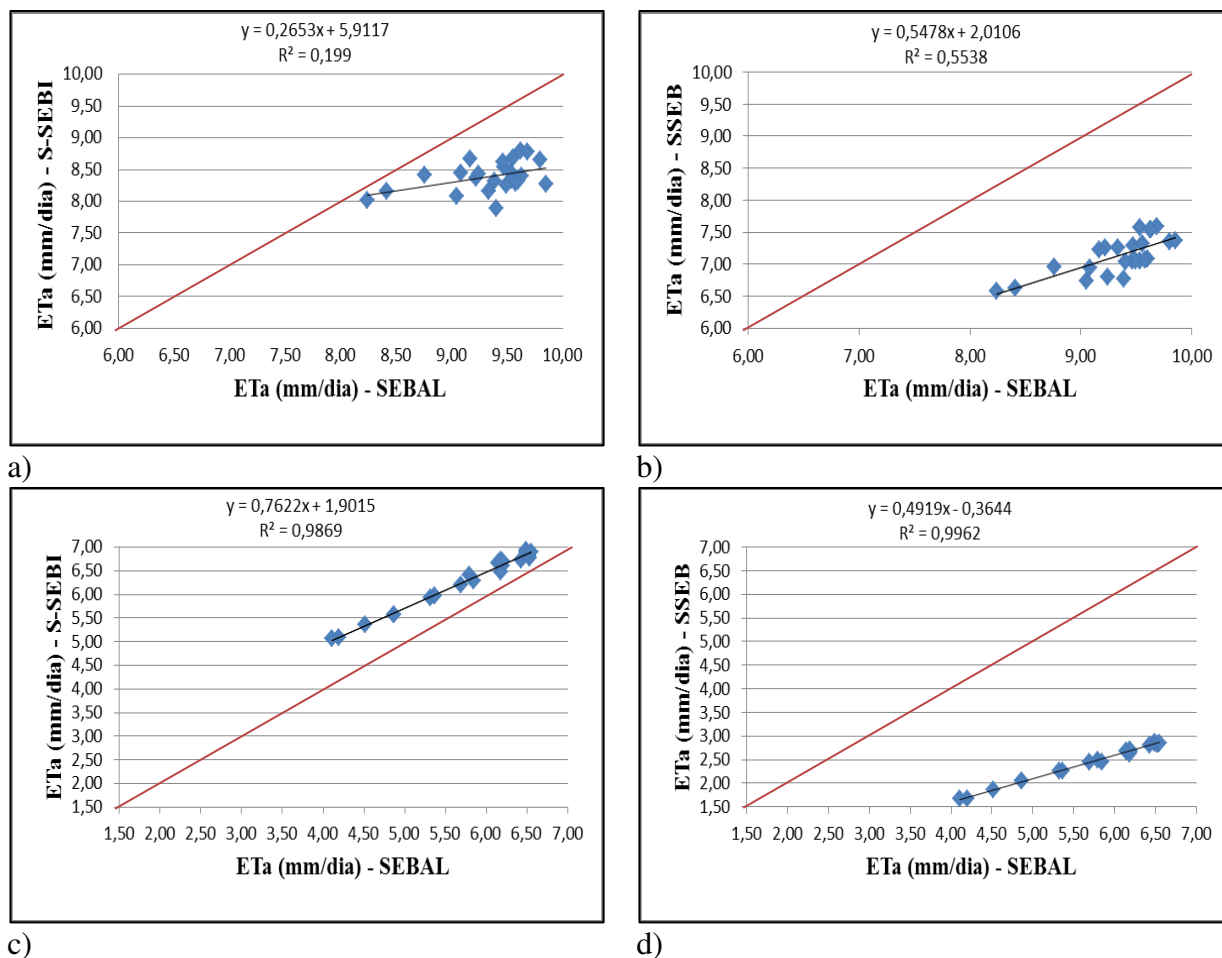
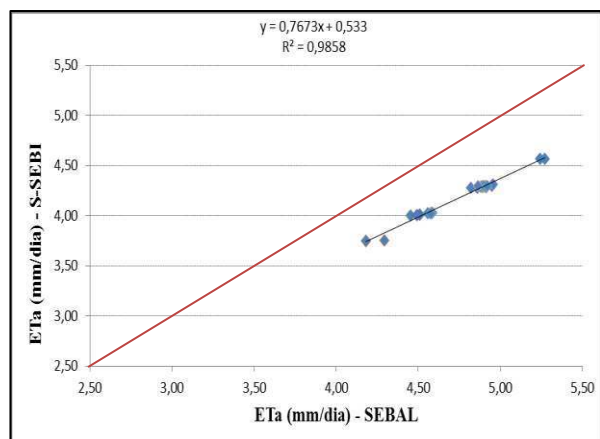
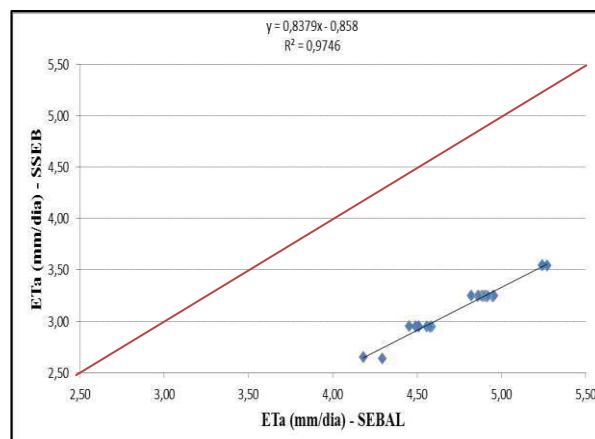


Figura 15. Correlações entre $aETa$ do SEBAL versus o S-SEBI e SSEB para recortes do pomar de bananeiras nos dias 297 (a, b) e 220 (c, d).

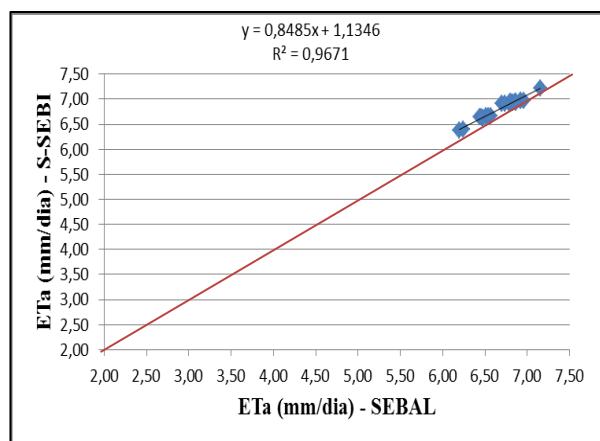
Na área de caatinga, as dispersões plotadas na Figura 16, apresentaram coeficiente de determinação acima de 0,90, e coeficiente de correlação superior a 0,96, indicando um ajuste muito bom, com menos de 10% de variação não explicada. Ocorreu subestimativa do S-SEBI na Figura 16a e do SSEB na Figura 16b e 16d, em relação ao SEBAL. No entanto, na Figura 16c, houve superestimativa do S-SEBI com o SEBAL.



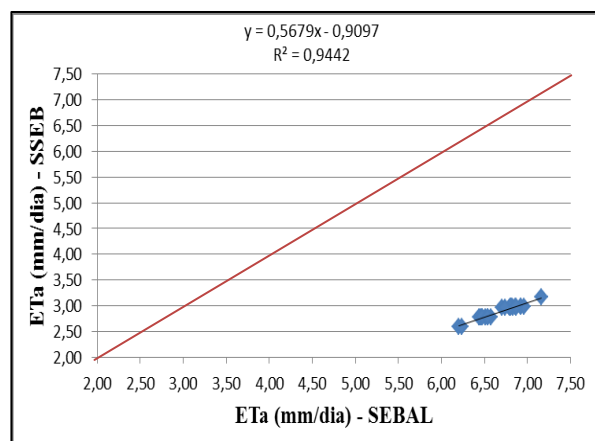
a)



b)



c)



d)

Figura 16. Correlações entre $aETa$ do SEBAL versus o S-SEBI e SSEB para recortes da caatinga nos dias 297 (a, b) e 220 (c, d).

Na Figura 17 encontrou-se o menor R^2 de quase 0,86 verificado na Figura 17b, e $r > 0,90$, representam forte correlação e a boa qualidade do ajuste, visto que a variação explicada dos modelos foi superior a 80%, sendo possível predize-los muito bem. O método SSEB foi subestimado em comparação ao SEBAL (Figuras 17b e 17d); enquanto que ocorreu superestimação do S-SEBI com o SEBAL (Figuras 17a e 17c).

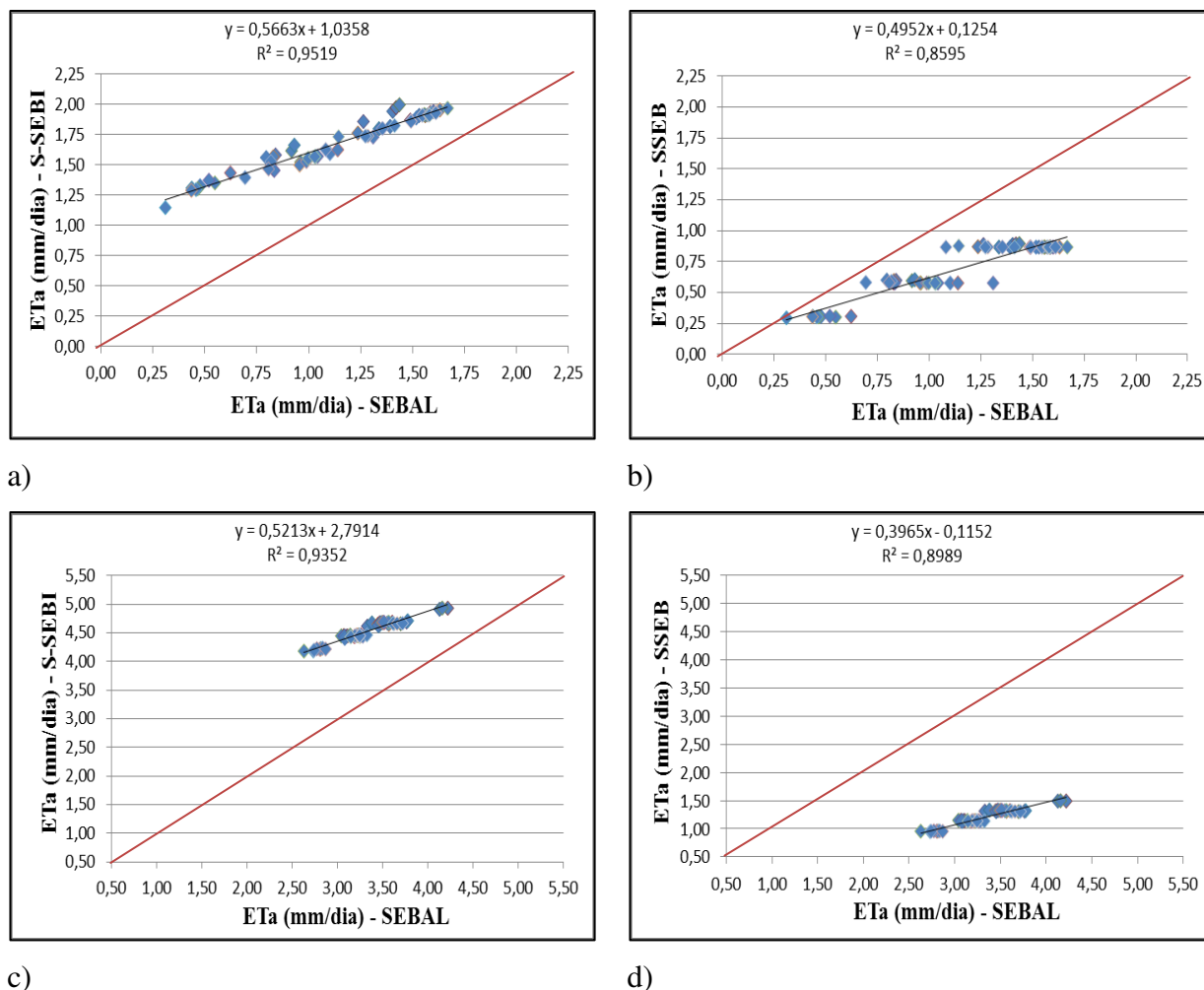


Figura 17. Correlações entre aETa do SEBAL versus o S-SEBI e SSEB para recortes do solo exposto nos dias 297 (a, b) e 220 (c, d).

Pode-se notar que a coerência entre os modelos (Figuras 15, 16 e 17) foi bastante satisfatória, isto é, tanto o S-SEBI e o SSEB podem ser adequadamente preditos com relação ao SEBAL, com exceção da Figura 15a e 15b e boa partes das variáveis exibiram coeficientes de determinação superior a 0,80. Weligepolage (2005) e Santos et al. (2010) também encontraram forte correlação da ETa diária, com R² igual a 0,95 para o primeiro autor e coeficiente de correlação (r) igual a 0,85 (com significância estatística de 5% – ($p < 0,05$)) para o segundo autor. No entanto, Platonov et al. (2008) relata que Senay et al. (2007) encontrou r de 0,55 a 0,79 entre o SSEB e o SEBAL, dependendo do tipo de cultura. No geral, para o S-SEBI ocorreu superestimação com o SEBAL, menos nas Figuras 15c e 16a. Contudo, a metodologia do SSEB subestimou

em todas as análises de verificação com o SEBAL, das Figuras 15, 16 e 17. Ou seja, devido a maior simplicidade dos modelos, S-SEBI e SSEB, em relação ao “robusto” algoritmo SEBAL, mundialmente testado e validado, estes apresentaram comportamento semelhante ao SEBAL, porém com tendências a subestimativa ou superestimado do modelo.

Analisou-se estatisticamente a evapotranspiração real diária (ETa) estimada via SEBAL e S-SEBI, das áreas de pomar, caatinga e solo exposto, para determinar a significância dos coeficientes das correlações ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), através do teste t – Student. Esta análise estatística foi organizada na Tabela 12, com respectivo coeficiente de correlação (r) das Figuras 10, 11 e 12.

De acordo com a Tabela 12, observa-se que a hipótese nula ($\rho = 0$) foi rejeitada, pois os valores calculados de t_1 e t_2 são maiores que o t_c e recaíram sobre a região de rejeição da curva de distribuição t . Portanto, há uma relação de significância entre os valores da ETa estimadas a partir dos algoritmos S-SEBI e SSEB em relação ao SEBAL.

Tabela 12. Estatística do teste t – Student, onde t_1 é o valor do teste da ETa calculada pelo S-SEBI/SEBAL, t_2 é o valor do teste da ETa calculada pelo SSEB/SEBAL gl (graus de liberdade), t_c (valor crítico).

Área:	DOA	r	gl	$\pm t_c$	t_1	t_2
Pomar	297	0,45	22	2,074	2,34	5,23
	220	0,74	22	2,074	40,71	75,94
Caatinga	297	0,99	28	2,048	44,09	32,78
	220	0,98	28	2,048	28,69	21,77
Solo Exposto	297	0,98	62	1,990	35,03	19,48
	220	0,97	62	1,990	29,91	23,48

As imagens da evapotranspiração real obtida pelos algoritmos de *SR* foram exportadas para planilhas, e determinaram-se as médias e o erro percentual para três tipos de áreas de interesse (pomar, caatinga e solo exposto), tendo o SEBAL como base.

Tabela 13. *ETa* estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI e SSEB, para o pomar de bananeiras, e seus respectivos erros.

DOA	<i>ETa</i> (mm/dia) – Pomar			Erro (%) – S-SEBI/SEBAL	Erro (%) – SSEB/SEBAL
	SEBAL	S-SEBI	SSEB		
297/2005	9,4	8,5	7,3	9,8	22,8
220/2006	5,8	6,3	2,5	9,1	57,2

Tabela 14. *ETa* estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI e SSEB, para a caatinga, e seus respectivos erros.

DOA	<i>ETa</i> (mm/dia) – Caatinga			Erro (%) – S-SEBI/SEBAL	Erro (%) – SSEB/SEBAL
	SEBAL	S-SEBI	SSEB		
297/2005	4,8	4,2	3,1	12,1	34,2
220/2006	6,7	6,8	2,9	1,8	56,8

Tabela 15. *ETa* estimada pelos modelos SEBAL, S-SEBI e SSEB, para o solo nu, e seus respectivos erros.

DOA	<i>ETa</i> (mm/dia) – Solo Exposto			Erro (%) – S-SEBI/SEBAL	Erro (%) – SSEB/SEBAL
	SEBAL	S-SEBI	SSEB		
297/2005	1,2	1,7	0,7	46,3	39,7
220/2006	3,3	4,5	1,2	36,5	63,9

Na Tabela 13, referente à área de pomar a comparação do S-SEBI com o SEBAL exibiu erros inferiores a 10%, enquanto para o SSEB a distinção com o SEBAL foi bem maior, com erros superiores a 22%. Na Tabela 14, para a caatinga, novamente, o S-SEBI apresentou a menor discrepância com o SEBAL que é a referência, com erros

inferiores a 13%; enquanto o SSEB exibiu erros superiores a 34%. Contudo na Tabela 15, referente à área de solo exposto ocorreu grande distinção entre os modelos S-SEBI/SEBAL, com erro maior que 36%. O SSEB (Tabela 15) exibiu alta discrepância da ETa estimada via SEBAL, igualmente ao comportamento demonstrado nas áreas de pomar e caatinga, com o menor erro de aproximadamente 40%.

Estas distinções, podem estar associadas às diferenças nas metodologias de obtenção da ETa , no SEBAL é obtida através da estimativa do LE como resíduo do balanço de energia, no S-SEBI através da λ que é estimada a partir de imagens de albedo (α) e temperatura da superfície (T_s) e no SSEB a partir da escolha dos pixels âncoras. De forma geral, em cada comparação os maiores valores de erro recaíram sobre a metodologia do SSEB, denotando a grande disparidade entre este método e o SEBAL, que dentre os três algoritmos analisados é o menos elaborado em termos das etapas do processamento das imagens e com mais fundamentação física nas suas equações.

A evapotranspiração estimada pelos modelos SR (SEBAL, S-SEBI e SSEB) expostas nas Tabelas 16, 17 e 18, foram testadas a partir da ETa calculada pela multiplicação da evapotranspiração de referência diária (ET_0) e o coeficiente de cultura (k_c) da banana, tendo k_c igual a 1,10 na fase de frutificação de regiões tropicais e climas áridos (EMBRAPA, 2013b; TEXAS, 2013). A ETa observada obtida através do k_c é usada como referência para encontrar as discrepâncias (erros percentuais) das ETa estimadas pelos modelos de SR .

Tabela 16. Erros percentuais da ETa estimada pelo SEBAL em comparação a observada.

DOA	ET_0 (mm/dia)	ETa (mm/dia) Observada	ETa (mm/dia) SEBAL	Erro (%) – SEBAL/ Observada
297/2005	8,7	9,6	9,3	1,9
220/2006	3,3	3,7	5,8	57,9

Tabela 17. Erros percentuais da *ETa* estimada pelo S-SEBI em comparação a observada.

DOA	<i>ET₀</i> (mm/dia)	<i>ETa</i> (mm/dia) Observada	<i>ETa</i> (mm/dia) S-SEBI	Erro (%) – S-SEBI/ Observada
297/2005	8,7	9,6	8,5	11,5
220/2006	3,3	3,7	6,3	72,3

Tabela 18. Erros percentuais da *ETa* estimada pelo SSEB em comparação a observada.

DOA	<i>ET₀</i> (mm/dia)	<i>ETa</i> (mm/dia) Observada	<i>ETa</i> (mm/dia) SSEB	Erro (%) – SSEB/ Observada
297/2005	8,7	9,6	7,3	24,3
220/2006	3,3	3,7	25	32,4

Observa-se na Tabela 16, que no dia 220 ocorreu grande diferença entre a *ETa* observada via k_c da estimada pelo SEBAL, de quase 58%. Da comparação *ETa* observada com a estimada pelo S-SEBI, na Tabela 17, novamente o maior erro ocorreu no dia 220, de aproximadamente 72%. Na Tabela 18, a comparação da *ETa* estimada via SSEB com a observada, verificou-se a maior distinção também do dia 220, porém com erros superiores a 23% nos dois dias.

Os menores erros mostrados aconteceram no dia 297, que correspondem ao período seco na região, em que as precipitações são insuficientes e o déficit hídrico da planta é alto. A taxa de evapotranspiração da bananeira é bastante influenciada pela quantidade de água disponível na zona radicular (SANTOS, 2009). Assim, a baixa disponibilidade deste recurso, possivelmente, provocou a redução dos valores de *ETa* neste dia observado.

6. CONCLUSÕES

O H exibiu maior variabilidade que o LE dentre os valores estimados pelo S-SEBI em comparação ao SEBAL, com menor erro de aproximadamente 7% e o maior de 55%, para o pomar e solo exposto, respectivamente. O que, podem estar relacionadas ao melhor refinamento do SEBAL.

O $IVDN$ e a A estimados apresentaram em geral, valores satisfatórios de r ($r > 0,71$) e exibiram comportamento crescente. O SSEB também apresentou a tendência de valores altos de $IVDN$ e ET_f , e r superiores a 0,73.

As comparações entre a A do S-SEBI e SEBAL, verificaram-se r maiores que 0,85 para as três áreas de interesse. De maneira geral, observou-se superestimação do modelo S-SEBI em relação ao SEBAL. E, de acordo com o teste t – Student aplicado ($\alpha = 0,05$) existe relação de significância entre as A .

Verificaram-se erros percentuais referentes à A do S-SEBI com o SEBAL, inferiores a 13% para as áreas de pomar e caatinga. Ocorreram erros maiores que 35% para o solo exposto, possivelmente, atribuído à ineficiência da aplicação do algoritmo S-SEBI em áreas com ausência de cobertura vegetal.

Nas análises da ETa estimada pelo S-SEBI e SSEB com o SEBAL, a maioria exibiu mais de 86% de variação explicada dos modelos ($r > 0,93$). Verificou-se que o SSEB subestimou a ETa em todas as análises, e de maneira geral o S-SEBI superestimou. De acordo com o teste t – Student ($\alpha = 0,05$) aplicado, conclui-se que a relação entre ETa foi significativa.

O S-SEBI exibiu erros inferiores a 12% para ETa no pomar e caatinga. O SSEB, não apresentou boa equivalência com o SEBAL, com erros superiores a 22%. Contudo,

para o solo exposto ambos os modelos apresentaram grandes discrepâncias em relação ao SEBAL, com erros superiores a 36%.

Portanto, dentre os dois algoritmos comparados em relação ao SEBAL, o S-SEBI mostrou melhor desempenho para estimar a *ETa* com menores discrepâncias entre os parâmetros analisados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL - Surface Energy Balance Algorithms for Land** – Advanced Training and User’s Manual – Idaho Implementation, version 1.0, 2002.

ALLEN, R. G., TASUMI, M., TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, p. 380-394, 2007.

ALVES, E. J., OLIVEIRA, M. A., DANTAS, J. L. L., OLIVEIRA, S. L. **Exigências climáticas**. In: Alves, E.J. A cultura da bananeira: Aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustriais. 2.ed. Brasília: Embrapa SPI, Cap.5, p.85–105, 1999.

BARROSO, A. A. F., VIANA, T. V. A., MARINHO, A. B., FILHO, R. R. G., AZEVEDO, B. M., COSTA, S. C. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da bananeira cv.“pacovan apodi” no terceiro ciclo de produção. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.4, n.1, p.23–30, 2010.

BASTIAANSSEN, W. G. M. Regionalization of surface fluxdensities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies inMediterranean climate. PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands. 272 p., 1995.

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

BASTIAANSSEN, W. G. M., PELGRUM, H., WANG, J., MA, Y., MORENO, J. F., ROENRINK, G. J., VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2.Validation.**Journal of Hydrology**, v. 212–213, p.213-229. 1998b.

BASTIAANSSEN, W.G.M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; UD-DIN-AHMED, M.; CHEMIN, Y. Satellite surveillance of water use across the Indus Basin. *Water Resources Research*, v. 38, p. 1273-1282,2002.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; CHANDRAPALA, L. Water balance variability accross Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**. V. 58, p. 171 – 192, 2003.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUN, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, p. 85-93, 2005.

BASTIAANSSEN W. G. M., PELGRUM, H., SOPPE, R. W. O., ALLEN, R. G., THORESON, B. P., TEIXEIRA, A. H. Thermalinfrared technology for local and regional scale irrigation analyses in horticultural systems, **Acta Hortic.**, v.792, p.33–46, 2008.

BEZERRA, M. V. C. Balanço de Energia em Áreas Irrigada Utilizando Técnicas deSensoriamento Remoto. 108f. Dissertação (Mestrado emMeteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB,2004.

BEZERRA, B. G. Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no cariri cearense através do algoritmo sebal. 2006. 127 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 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, p. 305-317, 2008.

BRANDÃO, Z. N.; SOFIATTI, V.; BEZERRA, B. G.; BEZERRA, J. R. C.; CUNHA MEDEIROS, J. C. Estimativa da necessidade hídrica do algodoeiro irrigado usando imagens de satélite. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011.

BRITISH COLUMBIA, Crop coefficients for use in irrigation scheduling - Ministry of Agriculture, Food and Fisheries. Disponível em: <http://www.agf.gov.bc.ca/resmgmt/publist/500Series/577100-5.pdf>. Acesso em: março de 2013.

BRUTSAERT, W., SUGITA, M. Application of self-preservation in the diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation. **Journal of Geophysical Research**, v.7, n.17, p.18 377-18382, 1992.

CAI, X. L., SHARMA, B. R. Remote sensing and census based assessment and scope for improvement of rice and wheat water productivity in the Indo-Gangetic Basin. **Science in China Series E: Technological Sciences**, v. 52, n. 11, p. 3300-3308, Nov., 2009.

CAI, X. L., SHARMA, B. R. Integrating remote sensing, census and weather data for an assessment of rice yield, water consumption and water productivity in the Indo-Gangetic river basin. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 309–316, 2010.

CALCAGNO, G. MENDICINO, G. MONACELLI, G. SENATORE, A. VERSACE, P. Distributed Estimation of Actual Evapotranspiration through Remote Sensing Techniques. **Water science and technology library**, v.62, p.25-148, 2007.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat 5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post calibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, p. 2674 2677, 2003.

COURALT, D.; SEGUIM, B.; OLIOSO, A. Review to estimate Evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use of

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

DI PACE, F. T. Estimativa do Balanço de Radiação à Superfície Terrestre Utilizando Imagens TM-Landsat 5 e Modelo de Elevação Digital. 120f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2004.

DINGMAN, S. L. **Physical Hydrology**, Macmillan College Publishing co., New York, 2002.

ELHADDAD, A., GARCIA, L. A. Surface Energy Balance-Based Model for Estimating Evapotranspiration Taking into Account Spatial Variability in Weather. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 134, p. 681 - 690, 2008.

EMBRAPA – *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*. Sistema Orgânico de Produção para a Cultura da Banana. Disponível em <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Banana/SistemaOrganicoCultivoBanana2ed/irrigacao.htm>. Consultado em: 21 de fevereiro de 2013a.

EMBRAPA – *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_5ed/glossario.htm. Acesso em: março de 2013b.

FAN, L.; LIU, S.; BERNHOFER, C.; LIU, H.; BERGER, F.H. Regional land surface energy fluxes by satellite remote sensing in the Upper Xilin River Watershed (Inner Mongolia, China). *Theoretical and Applied Climatology*, v. 88, p. 231-245, 2007.

FEITOSA, J. R. P. Uso de Técnica de Sensoriamento Remoto e Imagens Landsat-TM 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

FREITAS, W. S., RAMOS, M. M., COSTA, S. L. Demanda de irrigação da cultura da banana na bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.343–349, 2008.

GARCÍA, M., VILLAGARCÍA, L., CONTRERAS, S., DOMINGO, F., Juan PUIGDEFÁBREGAS, J. Comparison of Three Operative Models for Estimating the Surface Water Deficit using ASTER Reflective and Thermal Data. **Sensors**, v. 7, p. 86088, 2007.

GENTINE, P., ENTEKHABI, D., CHEHBOUNI, A., BOULET, G., DUCHEMIN, B. Analysis of evaporative fraction diurnal behavior. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 143, p. 13–29, 2007.

GÓMEZ, M.; OLIOSO, A.; SOBRINO, J. A.; JACOB, F. Retrieval of evapotranspiration over the Alpillles/ReSeDA experimental site using airborne POLDER sensor and a thermal camera. **Remote Sensing of Environment**, v.96, p. 399–408, 2005.

GOWDA, P. H., CHAVEZ, J. L., COLAIZZI, P. D., EVETT, S. R., HOWELL, T. A., TOLK, J. A. ET mapping for agricultural watermanagement: Present status and challenges. **Irrigation.Science**, v. 26, n. 3, p. 223-237, 2008.

GOWDA, P.H., SENAY, G.B., HOWELL, T.A., MAREK, T.H. Lysimetric evaluation of Simplified Surface Energy Balance approach in the Texas high plains. **Applied Engineering in Agriculture**,v. 25, p. 665–669, 2009.

HOEDJES, J.C.B.; CHEHBOUNI, A.,JACOB, F.; EZZAHAR, J.; BOULET, G.Deriving daily evapotranspiration from remotelysensed instantaneous evaporative fraction over oliveorchard in semi-arid Morocco. **Journal of Hydrology**, v. 354, p. 53–64, 2008.

JIA, D., KAISHAN, S., ZONGMING, W., BAI, Z., DIANWEI, L. Evapotranspiration Estimation Based on MODIS Products and SurfaceEnergy Balance Algorithms for Land (SEBAL) Model in Sanjiang Plain,Northeast China. **Science**, v.23, n.1, p.73–91, 2013.Revista Brasileira de Meteorologia, v.27, n.1, 85 - 94, 2012.

KAZMIER, L. J. **Estatística aplicada à economia e administração**. São Paulo: McGraw-Hill, 1982. (Coleção Schaum).

LOPES, G. M. Balanço de Radiação em Áreas Irrigadas Utilizando Imagens Landsat 5–TM. Dissertação de Mestrado, Campina Grande-PB: DCA/CCT/UFCG, 2003.

MENDONÇA, J. C., SOUSA, E. F., ANDRÉ, R. G. B., SILVA, B. B., FERREIRA, N. J. Estimativa do fluxo do calor sensível utilizando o algoritmo SEBAL e imagens

MODIS para a região norte fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.1, p.85 - 94, 2012.

MONTENEGRO, A. A. T., GOMES, A. R. M., MIRANDA, F. R., CRISÓSTOMO, L. A. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da bananeira para a região litorânea do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, p. 203-208, 2008.

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

PLATONOV, A.; THENKABAIL, P. S.; BIRADAR, C. M.; CAI, X.; GUMMA, M.; DHEERAVATH, V.; COHEN, Y.; ALCHANATIS, V.; GOLDSHLAGER, N.; BENDOR, E.; VITHANAGE, J.; MANTHRITHILAKE, H.; KENDJABAEV, S.; ISAEV, S. Water Productivity Mapping (WPM) Using Landsat ETM+Data for the Irrigated Croplands of the Syrdarya River Basin in Central Asia. **Sensors**, v.8, p.8156-8180, 2008.

ROENRINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance. **Physics and Chemistry of the Earth (B)**, v. 25, p. 147-157, 2000.

SAMPAIO, M. S., ALVES, M. C., CARVALHO, L. G., SANCHES, L. Uso de Sistema de Informação Geográfica para comparar a classificação climática de Koppen-Geiger e de Thornthwaite. In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2011, Curitiba, INPE p.8858.

SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. B.; RAMANA RAO, T. V. Estimativa da ET diária utilizando os algoritmos SEBAL e S-SEBI. **Revista Ciência e Natura**, v. Especial, p. 71-74, L2007.

SANTOS, C. A. C., SILVA, B. B. Estimativa da Evapotranspiração da Bananeira em Região Semiárida Através do Algoritmo S-SEBI. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, tREtp.9-20, 2008.

SANTOS, C. A. C. Estimativa da Evapotranspiração Real Diária Através de Análises Micrometeorológicas e de Sensoriamento Remoto. 2009. 143 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2009.

SANTOS, C. A. C. Aplicação do algoritmo S-SEBI na obtenção da evapotranspiração diária em condições áridas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 393 - 403, 2010.

SANTOS, C. A. C.; BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; RAO, T. V. R. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p.383-392, 2010.

SANTOS, C. A. C., SILVA, B. B. Obtenção dos fluxos de energia à superfície utilizando o algoritmo S-SEBI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, p. 365 - 374, 2010.

SENAY, G. B., BUDDE, M., VERDIN, J. P., MELESSE, A. M. A Coupled Remote Sensing and Simplified Surface Energy Balance Approach to Estimate Actual Evapotranspiration from Irrigated Fields. **Sensors**, v. 7, p. 979-1000, 2007.

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

SENAY, G. B., LEAKE, S., NAGLER, P. L., ARTAN, G., DICKINSON, J., CORDOVA, J. T., GLENN, E. P. Estimating basin scale evapotranspiration (ET) by

waterbalance and remote sensing methods. *Hydrological Processes*, v. 25, p. 4037–4049, 2011b.

SHUTTLEWORTH, W. J., GURNEY, R. J., HSU, A. Y., ORMSBY, J. P., FIFE: The variation in energy partitioning at surface flux sites, Remote sensing and large-scale processes. Proceedings of the IAHS Third International Assembly. Baltimore, USA: IAHS Publication, p. 67–74, 1989.

SIBCS - *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 412, 1999.

SOBRINO, J. A., GÓMEZ, M., JIMÉNEZMUÑOZ, J. C., OLIOSO, A. Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula. **Remote Sensing of Environment**, v. 110, p. 139-148, 2007.

SOBRINO, J. A., GÓMEZ, M., JIMÉNEZMUÑOZ, J. C., OLIOSO, A., CHEHBOUNI, G. A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: Application to the DAISEX Campaigns. **Journal of Hydrology**, v. 315, p. 117-125, 2005.

SOUZA, I., PEREIRA, M. C. T., RIBEIRO, R. C. F., NIETSCHKE, S., MAIA, V. M., LEMOS, J. P. Plantio irrigado de bananeiras resistentes à sigatoka-negra consorciado com culturas anuais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 32, p. 172-180, 2010.

STULL, R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Dordrecht-The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, p. 85–99, 2002.

SUGITA, M., BRUTSAERT, W. Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles measured with radiosondes. *Water Resources Research*, v. 27, n.5, p. 747-752, 1991.

TASUMI, M. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. PhD thesis, Dept. Biological and Agricultural Engineering, Univ. Idaho, 2003.

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

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

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

TEXAS ET NETWORK. **Grower's Guide: Using PET for Determining Crop Water Requirements and Irrigation Scheduling**. Disponível em <http://texaset.tamu.edu/growers.php>. Consultado em: 21 de fevereiro de 2013.

TREZZA, R. Evapotranspiration using satellite-based surface energy balance with standardized ground control. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering) - Utah State University, Logan. p. 247, 2002.

USA, 2002.

VERSTRAETENA, W. W., VEROUSTRAETE, F., FEYEN, J. Estimating evapotranspiration of European forests from NOAA-imagery at satellite overpass time:

Towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, p.256–276, 2005.

WANG, K., LI, Z., CRIBB, M. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and nightland surface temperatures and IVDN: A new method to determinethe Priestley–Taylor parameter. **Remote Sensing of Environment**v. 102, p. 293–305, 2006.

WELIGEPOLAGE, K. Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration by satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek, The Netherlands.2005, 114 p, Dissertation (Master of Science), International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Wageningen, Netherlands, 2005.

YABRAA, M., DIJK, A. V., Leuning, R., Huete, A., Guerschman, J. P. Evaluation of optical remote sensing to estimate actual evapotranspiration and canopy conductance. **Remote Sensing of Environment**, v. 129, p. 250–261, 2013.

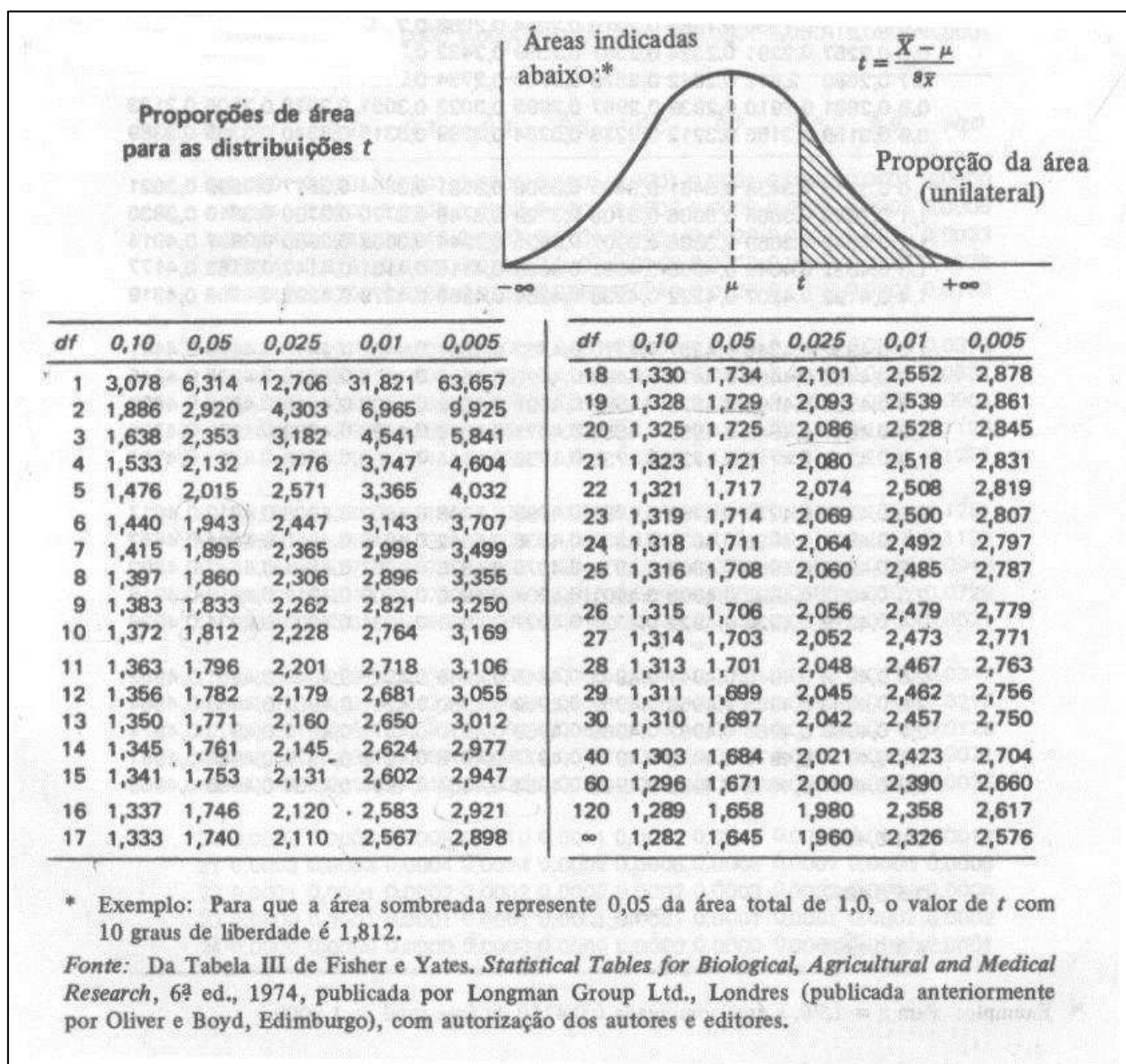
ZAHIRA, S., ABDERRAHMAME, H., MEDERBAL, K., FREDERIC, D. Mapping Latent Heat Flux in the Western Forest Covered Regions of Algeria Using Remote Sensing Data and a Spatialized Model, **Remote Sensing**, v. 1, p. 795-817, 2009.

ANEXO A – Análise Estatística e Significância do Coeficiente de Correlação (r)

A análise de correlação simples mede o grau de relação entre as variáveis, a qual diz respeito à medida entre, apenas, uma variável independente e a variável dependente. O coeficiente de correlação para dados amostrais (r) é dado através da raiz quadrada do coeficiente de determinação (R^2), pode ser testado estatisticamente segundo uma distribuição estatística t – Student, quando a correlação populacional (ρ) é zero. O valor de R^2 indica a proporção da variância (incerteza) de Y explicada pelo conhecimento de X e vice-versa. O sinal do coeficiente de correlação indica a direção da relação entre X e Y , enquanto o valor absoluto indica a extensão da relação.

Para o teste de significância da correlação, considera-se a hipótese nula de interesse (H_0) quando $\rho = 0$ e hipótese alternativa (H_1) com $\rho \neq 0$, de acordo com um nível de significância (α) estipulada. Se H_0 é rejeitada, conclui-se que existe uma relação significativa entre as variáveis. Então, a estatística amostral de r é tal qual uma distribuição t – Student com $n - 2$ graus de liberdade para $\rho = 0$ (KAZMIER, 1982).

$$t = r / \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}$$

ANEXO B – Tabela da Distribuição t – Student.

(Fonte: KAZMIER, 1982)