



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

PAMELLA CRISLEY COSTA DE SÁ

**ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO EM CULTIVO IRRIGADO DE
CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO
ORBITAL**

**MOSSORÓ – RN
FEVEREIRO 2016**

PAMELLA CRISLEY COSTA DE SÁ

**ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO EM CULTIVO IRRIGADO DE
CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO
ORBITAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como parte dos requisitos para obtenção do Título em “Mestre em Manejo de Solo e Água”.

Linha de Pesquisa: Manejo de solo e água na agricultura

Orientador: Prof. D. Sc. José Espínola Sobrinho – UFERSA (Mossoró – RN)

Co-orientador: Prof. D. Sc. Rafael da Costa Ferreira – UFERSA (Angicos – RN)

MOSSORÓ – RN
2016

d111e de Sá, Pamella Crisley Costa.
Estimativa do saldo de radiação em cultivo irrigado de cana-de-açúcar utilizando dados de sensoriamento remoto orbital / Pamella Crisley Costa de Sá. - 2016.
60 f. : il.

Orientador: José Espínola Sobrinho.
Coorientador: Rafael da Costa Ferreira.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água, 2016.

1. Sensoriamento remoto. 2. Saldo de radiação. 3. Evapotranspiração. I. Espínola Sobrinho, José , orient. II. Ferreira, Rafael da Costa, co-orient. III. Título.

PAMELLA CRISLEY COSTA DE SÁ

**ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO EM CULTIVO IRRIGADO DE
CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO
ORBITAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como parte dos requisitos para obtenção do Título em “Mestre em Manejo de Solo e Água”.

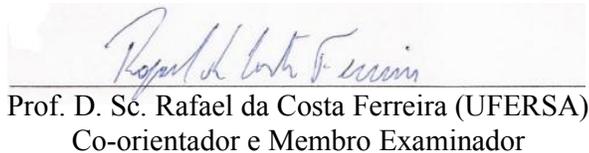
Linha de Pesquisa: Manejo de solo e água na agricultura.

Defendida em: 26 /02 /2016

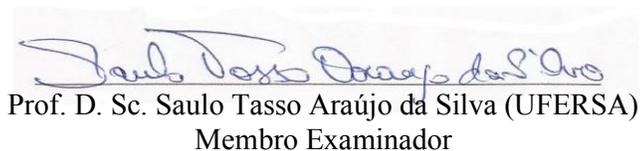
BANCA EXAMINADORA



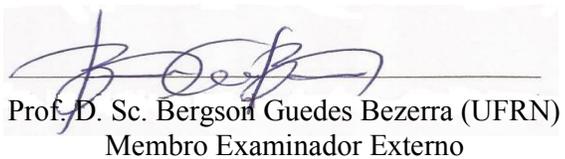
Prof. D. Sc. José Espínola Sobrinho (UFERSA)
Presidente



Prof. D. Sc. Rafael da Costa Ferreira (UFERSA)
Co-orientador e Membro Examinador



Prof. D. Sc. Saulo Tasso Araújo da Silva (UFERSA)
Membro Examinador



Prof. D. Sc. Bergson Guedes Bezerra (UFRN)
Membro Examinador Externo

Ao meu querido avô, Francisco Cícero de Sá, homem íntegro, admirador dos livros e incentivador da leitura... Tão cedo nos deixou! Guardo em minha memória os momentos vividos ao seu lado; sei o carinho que tinha por mim e o orgulho que sentiria caso estivesse entre nós (*In Memoriam*).

A minha Mãe, que sempre se esforçou para que eu tivesse um estudo de qualidade. Ao meu amado Esposo e Filho, pela paciência e compreensão nos momentos de ausência. Por todo amor, pelas palavras positivas, força e companheirismo. Vocês são o que eu tenho de mais precioso.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Pai pela dádiva da vida; porque eu nada seria sem sua misericórdia e amor.

A minha mãe, Carla Crisleide Costa, meu anjo da guarda, que sempre está ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu amado filho, Lucas Gabriel, que é a minha fonte inesgotável de amor, que tanto me orgulha, entende e me ama. Meu maior tesouro na vida.

Ao meu esposo, Antonio Esildo Costa Filho, companheiro em todos os momentos, dono do meu coração e por quem eu tenho enorme admiração.

Ao meu pai, Paulo Andrade de Sá, por ter me dado suporte durante a jornada de estudante.

À Aurilene Francelino de Almeida, pela dedicação quase que exclusiva durante dezesseis anos de minha vida e por continuar torcendo e se preocupando comigo até hoje.

Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, pela oportunidade de crescimento profissional.

Ao Professor José Espínola Sobrinho, no qual eu sempre tive uma grande admiração e respeito. Esse homem de coração sensível e de uma força incrível para vencer os obstáculos da vida. Enfim, agradeço pela orientação, ensinamentos, compreensão e principalmente pela amizade.

Ao Professor Saulo Tasso por sempre se mostrar disponível quando solicitei sua ajuda e por ter sido a luz nos momentos de questionamentos, incertezas e dificuldades.

Ao Professor Bernardo Barbosa da Silva que foi o responsável por eu ter aceitado o desafio de desenvolver este trabalho. Pois, muito me ensinou sobre o uso do Sensoriamento Remoto na Agricultura e seus princípios e como utilizar a ferramenta (ERDAS) para a estimativa dos componentes do Balanço de Radiação.

Ao Professor Rafael da Costa Ferreira pela contribuição.

A EMBRAPA Semiárido, em especial à pesquisadora Dra. Magna Soelma Beserra de Moura pela liberação dos dados de superfície usados neste trabalho.

A todos os Docentes que fazem parte do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, especialmente os que lecionaram a mim, como: José Francismar de Medeiros, José Espínola Sobrinho, Carolina Malala, Rafael de Oliveira Batista.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram ou participaram da jornada do meu Mestrado.

A todos, meu muito Obrigado!

RESUMO

No Brasil há uma grande irregularidade ou inexistência de dados de radiação, que acaba comprometendo diversos estudos. Desta forma, o emprego de técnicas de sensoriamento remoto apresenta-se como um campo promissor, com a vantagem da determinação dos componentes do balanço de radiação com grande cobertura espacial de forma rápida e precisa e, juntamente com dados de superfície têm sido indispensáveis na aplicação de modelos e algoritmos destinados à estimativa dos componentes do balanço de energia à superfície e da evapotranspiração em várias escalas de tempo e espaço, sendo este o principal fator a ser considerado na estimativa das necessidades hídricas da cultura. O objetivo deste projeto de pesquisa foi determinar os componentes do balanço de radiação em área de cana-de-açúcar a partir de dados MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) inseridos no modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) e validá-los com dados obtidos à superfície em área produtiva de cana-de-açúcar irrigada pertencente à empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A - Agrovale no município de Juazeiro - BA. Concluiu-se que não houve nenhuma condição atípica no comportamento dos termos do balanço de radiação obtidos à superfície, quando se consideraram os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura embora os valores absolutos dos termos tenham sido diferentes. Os termos do Balanço de Radiação encontrados através de imagens MODIS aplicando o modelo SEBAL apresentaram comportamento esperado para os alvos, com valores consistentes e próximos aos encontrados à superfície, exceto para o albedo que apresentou erros de 54,5%, 50%, 11,7% e 26% para as fases de I a IV, respectivamente. Por fim, a evapotranspiração usando o R_n proveniente do processamento de imagens de satélite não apresentou diferença significativa em relação a ET_{cBERB} e a ET_{cPM1} . Conclui-se, portanto, que o sensoriamento remoto pode perfeitamente ser usado na determinação das necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar na região em estudo.

Palavras-chave: **Fluxo radiativo; evapotranspiração; saldo de radiação.**

ABSTRACT

In Brazil there is a great irregularity and no radiation data that has just committing several studies. Thus, the use of remote sensing techniques is presented as a promising field, with the advantage of determining the components of the radiation balance with high spatial coverage quickly and accurately, and together with surface data have been indispensable in the application models and algorithms to estimate the components of the energy balance at the surface and evapotranspiration at various scales of time and space, which is the main factor to be considered in estimating water needs of the crop. The aim of this research project was to determine the components of the radiation balance in sugarcane area from MODIS (MODIS) inserted in SEBAL model (Surface Energy Balance Algorithm for Land) and validate them with data to the surface in the production area of sugarcane irrigated belonging to the company Agribusiness of the São Francisco Valley SA - Agrovale in Juazeiro - BA. It was concluded that there was no unusual condition in the behavior of the terms of the radiation balance obtained on the surface, when considering the different growth stages although the absolute values of the terms were different. The terms of the Radiation Balance found through MODIS images by applying the model SEBAL had expected behavior for targets with consistent and similar values to those found on the surface except for the albedo that had errors 54.5%, 50%, 11.7% and 26% for phases I to IV, respectively. Finally, the evapotranspiration using R_n from the satellite imaging showed no significant difference we react to ETcBERB and ETcPM1. It follows, therefore, that remote sensing can be perfectly used in determining the water needs of the crop of sugarcane in the region under study.

Keywords: **radiative flux; evapotranspiration; MODIS; SEBAL.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área experimental na Usina Agrovale, Juazeiro, BA.....	17
Figura 2 - Representação do <i>tiles</i> H14V09.....	19
Figura 3 - MRT, para conversão de dados HDF para HDR ou GEOTIFF.....	20
Figura 4 - Comportamento dos componentes do balanço de radiação durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 09/11/2009.....	29
Figura 5 - Comportamento dos componentes do balanço de radiação durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009.....	30
Figura 6 - Comportamento dos componentes do balanço de radiação durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010.....	31
Figura 7 - Comportamento dos componentes do balanço de radiação durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010.....	32
Figura 8 - Comportamento do albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 09/11/2009.....	33
Figura 9 - Comportamento do albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009.....	33
Figura 10 - Comportamento do albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010.....	34
Figura 11 - Comportamento do albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010.....	34
Figura 12 - Mapa temático da distribuição do albedo (α) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/11/2009.....	36
Figura 13 - Mapa temático da distribuição do IAF obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/11/2009.....	37

Figura 14 - Mapa temático da distribuição do Balanço de Radiação (Rn) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/11/2009.....	38
Figura 15 - Mapa temático da distribuição do albedo (α) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009.....	39
Figura 16 - Mapa temático da distribuição do IAF obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009.....	41
Figura 17 - Mapa temático da distribuição do Balanço de Radiação (Rn) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009.....	42
Figura 18 - Mapa temático da distribuição do albedo (α) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010.....	44
Figura 19 - Mapa temático da distribuição do IAF obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010.....	45
Figura 20 - Mapa temático da distribuição do Balanço de Radiação (Rn) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010.....	46
Figura 21 - Mapa temático da distribuição do albedo (α) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010.....	48
Figura 22 - Mapa temático da distribuição do IAF obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010.....	48
Figura 23 - Mapa temático da distribuição do Balanço de Radiação (Rn) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das datas das imagens com as fases fenológicas, duração e DAP.....	17
Tabela 2 - Descrição dos produtos MODIS utilizados.....	20
Tabela 3 - Pesos atribuídos às bandas do sensor MODIS no cálculo do albedo de superfície segundo o modelo Tasumi et al. (2008).....	22
Tabela 4 - Medidas de concordância Viés (VS) ($W m^{-2}$) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) ($W m^{-2}$), balanço de radiação (Rn) ($W m^{-2}$) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) ($W m^{-2}$) para 09/11/2009	39
Tabela 5 - Medidas de concordância Viés (VS) ($W m^{-2}$) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) ($W m^{-2}$), balanço de radiação (Rn) ($W m^{-2}$) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) ($W m^{-2}$) para 09/12/2009.....	43
Tabela 6 - Medidas de concordância Viés (VS) ($W m^{-2}$) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) ($W m^{-2}$), balanço de radiação (Rn) ($W m^{-2}$) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) ($W m^{-2}$) para 11/03/2010.....	46
Tabela 7 - Medidas de concordância Viés (VS) ($W m^{-2}$) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) ($W m^{-2}$), balanço de radiação (Rn) ($W m^{-2}$) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) ($W m^{-2}$) para 03/10/2010.....	50
Tabela 8 - Valores da Evapotranspiração da cultura da cana de açúcar ($mm.d^{-1}$) determinada por diferentes metodologias: ETcBERB (Balanço de Energia pela Razão de Bowen); ETcPM1 (Penman-Monteith-FAO) usando o saldo de radiação (Rn) medido à superfície, ETcPM2 (Penman-Monteith-FAO) usando o saldo de radiação (Rn) determinado pelo satélite.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BERB	Balanço de Energia pela Razão de Bowen
CIB	Conselho de Informações sobre Biotecnologia
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DAP	Dia após o plantio
DAS	Dia seqüencial do ano
EDOS	<i>Data and Operations System</i>
EOS	<i>Earth Observing System</i>
ET	Evapotranspiração
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
HDF	<i>Hierarchical Data Format</i>
IAF	Índice de Área Foliar
Kc	Coeficiente de cultura
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SR	Sensoriamento Remoto
TDRSS	<i>Tracking and Data Relay Satellite System</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Albedo
α_s	Albedo da superfície
β	Razão de Bowen
CO ₂	Dióxido de carbono
ε_s	Emissividade da superfície
G	Fluxo de calor no solo
H	Calor sensível
ha	Hectare
J	Joule
Kg	Quilograma
kPa	Quilo Pascal
m	Metro
mm	Milímetro
MJ	Mega Joule
Rn	Saldo de radiação
K	Kelvin
K*	Balanço de radiação de ondas curtas
K↓	Radiação de onda curta incidente
K↑	Radiação de onda curta refletida
L*	Balanço de radiação de ondas longas
L↓	Radiação de onda longa incidente
L↑	Radiação de onda longa emitida
W	Watt
°	Graus
°C	Grau Celsius
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Geral.....	3
2.2 Específicos.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1 Primórdios da cana de açúcar no Brasil e no mundo.....	5
3.2 Balanço de radiação.....	8
3.3 Evapotranspiração.....	10
3.4 Sensoriamento remoto.....	13
3.5 Sensor MODIS e seus produtos.....	14
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4.1 Descrição da área de estudos.....	16
4.2 Dados micrometeorológicos.....	17
4.3 Dados orbitais.....	18
4.4 Balanço de Radiação – Sensoriamento Remoto.....	21
4.5 Validação das estimativas.....	25
4.6 Determinação da evapotranspiração.....	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
5.1 Comportamento dos componentes do balanço de radiação à superfície.....	28
5.2 Comportamento dos componentes do balanço de radiação através de imagens MODIS e concordância entre os valores observados e modelados.....	36
5.3 Evapotranspiração da cultura.....	51
6. CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo (CONAB, 2015b). Essa posição privilegiada é decorrência do crescimento da produção de açúcar e álcool devido o aumento do uso de álcool combustível, em virtude do surgimento dos veículos biocombustíveis e por ser uma forma de energia limpa e renovável, haja vista que a queima da cana como combustível lança menos CO₂ na atmosfera que os combustíveis fósseis, bem como em função do crescimento das exportações de açúcar que, juntos marcam a importância da cultura na economia brasileira e traz sempre ótimas perspectivas para o setor.

Entretanto, essa atividade vem passando por problemas provenientes, principalmente, das adversidades climáticas que causam queda na produção e conseqüentemente na produtividade, ao passo que o mercado exige quantidade e qualidade a custos cada vez menores, impondo ao setor a necessidade de estudos para contornar as limitações climáticas de algumas regiões de modo a possibilitar uma produção contínua de forma a equilibrar o mercado em um cenário exigente e de crescente demanda.

Essas adversidades climáticas geraram segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, uma queda na produtividade na safra de 2014/15 em relação à safra passada, passando de 74.769 kg/ha para 72.444 kg/ha (só não foi maior porque houve um leve aumento na área plantada no país). Sendo a região sudeste a responsável por esse decréscimo devido a altas temperaturas e baixas precipitações no final de 2013 e início de 2014, impactando diretamente o desenvolvimento da cultura, tanto na fase de rebrota, quanto de crescimento; prejudicando o perfilhamento da cultura e o desenvolvimento dos colmos, o que reflete diretamente no rendimento de cana-de-açúcar por hectare (CONAB, 2015c). O prognóstico para a safra de 2015/16 é de que ocorra um incremento de 3,1% na produção em relação a safra passada e só não será maior porque não haverá aumento significativo da área plantada e a produtividade nos canaviais de São Paulo, maior estado produtor, que se recuperam de um impacto hídrico da safra 2014/15 (CONAB, 2015b).

De um modo geral as perdas na produtividade estão associadas às severas secas que acometem o Nordeste do Brasil e as estiagens e geadas no Centro Sul do País que elevam os custos de produção e reduzem a lucratividade e rentabilidade do setor sucroalcooleiro.

No Brasil a cana-de-açúcar é cultivada em todas as regiões e submetida a diferentes condições climáticas devido à grande extensão territorial do mesmo. Certas regiões possuem clima favorável, sem restrição alguma, enquanto que outras apresentam restrições térmicas e/ou hídricas moderadas, que permitem a produção econômica da cultura sem exigir recursos e técnicas especiais. Entretanto, há aquelas que apresentam restrições limitantes e somente o cultivo de variedades selecionadas e o emprego de recursos extras podem corrigir as deficiências hídricas ou técnicas, viabilizando economicamente a atividade canavieira (ANDRÉ et al, 2010).

A cultura da cana-de-açúcar é bastante exigente de condições climáticas ideais, necessitando de condições favoráveis de chuvas e umidade bem equacionada com a temperatura. Como existe a necessidade de alta produção de sacarose, a planta precisa encontrar condições de temperatura e umidade adequadas para permitir desenvolvimento suficiente, carecendo também de período com certa restrição hídrica ou térmica, para forçar o repouso e enriquecimento de sacarose na época do corte.

Os componentes climáticos responsáveis pela maior expressão de produtividade da cana-de-açúcar são: temperatura (16 °C a 33 °C), alta incidência de radiação solar e disponibilidade de água no solo, ou seja, ela é considerada uma planta essencialmente tropical. Temperaturas oscilando entre 26 °C e 33 °C são favoráveis durante o estágio de desenvolvimento da cultura (CONAB, 2015b). Ademais, a temperatura é um condicionante não controlável.

A distribuição da precipitação durante o ano também é de suma importância para o desenvolvimento da cultura, pois pode acarretar déficit hídrico nos diferentes estágios implicando decréscimos na produtividade devido a redução: nos perfilhos, da área foliar, no crescimento dos colmos, além de estimular a senescência. Outros fatores responsáveis e determinantes na intensidade do perfilhamento são a temperatura e a radiação solar, acrescido da variedade utilizada, da densidade do plantio, e do ciclo (cana-planta ou soca), assim como a disponibilidade de nitrogênio no solo (SUGUITANI; MATSUOKA, 2001).

Sendo assim, para resolver o problema da disponibilidade de água devido a escassez de chuva dispomos do uso da irrigação, que é uma solução eficaz para suprir as necessidades hídricas das plantas. Porém, em regiões onde a mesma é fator limitante, que é o caso do semiárido brasileiro, otimizar a utilização desse recurso é fundamental, uma vez que a condição climática não favorece a oferta de água e o custo advindo dos

processos de irrigação são um dos principais responsáveis por elevar o custo final da produção.

Para Borges, (2011) o manejo eficiente da água na irrigação deve considerar a aplicação da menor quantidade de água possível de maneira a promover uma boa produção e conservação do solo, garantindo a sustentabilidade destes recursos. Para tal, se faz necessário o estudo do comportamento evapotranspirativo dessas áreas cultivadas através dos fluxos radiativos no sistema solo-planta-atmosfera, que tem como base a determinação dos componentes do balanço de radiação.

No entanto, diversos estudos são inviabilizados pela inexistência ou descontinuidade na coleta de dados sobre radiação no Brasil. Essa é agravada por erros instrumentais advindos da baixa sensibilidade dos sensores e da falta de calibração dos mesmos que compromete a precisão das medições radiométricas. Desta forma, o emprego de técnicas de sensoriamento remoto apresenta-se como um campo promissor, com a vantagem da determinação dos componentes do balanço de radiação em escala regional para cada parte da superfície com grande cobertura espacial de forma rápida e precisa (FERREIRA, 2014), possibilitando, assim, uma estimativa mais precisa das necessidades hídricas da cultura em cada fase de desenvolvimento.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Determinar os componentes do balanço de radiação em área de cana-de-açúcar a partir de dados MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) inseridos no modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*).

2.2 Específicos

- Determinar os componentes do balanço de radiação em área de cana-de-açúcar através dos dados micrometeorológicos coletados em superfície;
- Determinar os componentes do balanço de radiação em área de cana-de-açúcar a partir de imagens coletadas pelo sensor MODIS.
- Validar os resultados obtidos através de imagens orbitais com os dados obtidos à superfície.
- Determinar a evapotranspiração da cultura pelo método de Penman Montheit usando o saldo de radiação medido à superfície e o determinado pelo satélite e, também, pelo método da Razão de Bowen.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Primórdios da cana-de-açúcar no Brasil e no mundo

No que se refere à origem da cana de açúcar há muita controvérsia, porém, grande maioria da comunidade científica aponta que as principais espécies conhecidas têm sua origem na Oceania (Nova Guiné) de onde se espalhou pelas ilhas da Indonésia, até que migrou para o continente, se estabelecendo na Índia e China. No entanto, quanto ao desenvolvimento de técnicas de produção os Persas foram pioneiros. Além de terem estabelecido as rotas do açúcar entre países asiáticos e africanos (DELGADO; CESAR, 1977).

As primeiras mudas da planta chegaram ao Brasil em Pernambuco por volta de 1515, vindas da Ilha da Madeira (Portugal), e seu cultivo teve início por volta de 1532, quando a cultura foi introduzida por Martin Afonso de Souza, na capitania de São Vicente (hoje São Paulo) (CONAB, 2015b), onde foi estabelecido o primeiro engenho no Brasil. Porém, o complexo agroindustrial canavieiro só constituiu-se depois que a extração e a exportação do pau-brasil (mais antiga atividade econômica do Brasil) perderam forças, devido ao começo do esgotamento de suas reservas naturais (NAPP, 2008). Em menos de vinte anos as plantações de cana-de-açúcar se espalharam pelo litoral brasileiro, de modo que no século seguinte o país já era o maior produtor mundial de açúcar, posição mantida até o fim do século XVII (CIB, 2009).

Os grandes centros açucareiros na colônia foram as capitanias de Pernambuco e Bahia, regiões próximas à úmida zona litorânea do Nordeste brasileiro, conhecida como Zona da Mata. Fatores climáticos, geográficos, políticos e econômicos explicam essa localização. As duas capitanias combinavam, na região costeira, boa qualidade de solos e um adequado regime de chuvas. Estavam mais próximos dos centros importadores europeus e contavam com relativa facilidade de escoamento da produção, na medida em que Salvador e Recife se tornaram portos importantes (BONAN e KUHN, 2012).

Inicialmente a cana-de-açúcar foi cultivada no Brasil, voltada principalmente para a fabricação de açúcar, refinado, granulado, mascavo, entre outros. Com o passar dos tempos, a cana foi gradativamente sendo utilizada como matéria-prima para a fabricação de etanol anidro (aditivo para gasolina) e hidratado (incentivado pelo Plano Pró-álcool) e outros subprodutos, como por exemplo, o bagaço de cana, a vinhaça e a levedura.

A cana pode ser toda aproveitada: do caldo obtêm-se o açúcar, a cachaça, o álcool, a rapadura e outros; do bagaço, o papel, a ração, o adubo ou o combustível; das folhas a cobertura morta ou ração animal. Assim, a agroindústria da cana-de-açúcar, direciona-se a integrar os sistemas de produção alimentar, não alimentar e energético, envolvendo atividades agrícolas e industriais, e ainda atua com vantagens comparativas em relação às outras matérias-primas, pelo fato de ser intensiva em mão-de-obra e o Brasil ter os menores custos de produção do mundo (VASCONCELOS, 2002).

Hoje, o Brasil tem novamente a primeira posição no ranking mundial na produção da cultura, seguido por Índia e China, como também o maior produtor de açúcar e etanol de cana-de-açúcar. Responsável por mais de 50% do açúcar comercializado no mundo. Apesar de pouco mais de 50% da produção estar concentrada em São Paulo, a cultura é cultivada em todas as regiões do país em dois períodos de safra. De um modo geral, o país tem dois calendários de colheita, um para a região Norte-Nordeste, que vai de setembro a abril e outro para o Centro-Sul, de maio a novembro (CONAB, 2015a).

A CONAB, 2015a caracteriza o cultivo de cana-de-açúcar em todos os estados brasileiros e menciona que: no estado do Amazonas a produção de açúcar e etanol é pouco representativa na atividade agrícola do estado. No Ceará o cultivo apresenta dificuldades há muito tempo, devido à desativação de muitas Unidades de Produção de açúcar e etanol e às estiagens prolongadas penalizam o estado desde 2012, prejudicando diretamente a produção da cana-de-açúcar, que no estado é voltado exclusivamente para o etanol. Enquanto que no Maranhão os potenciais problemas ocasionados pela escassez pluvial são amenizados pela irrigação.

O Rio Grande do Norte sempre apresentou problemas com estiagem e nos últimos anos tem sofrido com o prolongamento da mesma, que afeta fortemente a produção agrícola no estado, entretanto, para a cana-de-açúcar, cultivada na região Leste e Agreste potiguar, onde a produção é destinada ao setor sucroalcooleiro, o impacto da escassez d'água tenha sido em menor escala, por ser uma região onde as precipitações pluviométricas costumam ser mais favoráveis, além de contar com reservatórios d'água (açudes, lagoas etc), facilitando a utilização da irrigação em parte do canavial. Já para aquelas áreas não irrigadas, constatou-se um déficit no suprimento d'água no momento da formação da lavoura, especialmente na cana soca, levando as Unidades de Produção a dispendir investimentos extras para manter níveis de produtividade razoáveis. Em determinadas áreas do plantio a falta de chuva na fase de perfilhamento da planta

limitou o crescimento dos colmos e para minimizar as exigências hídricas da cana-de-açúcar as Unidades de Produção utilizaram a irrigação.

No estado da Bahia, mais precisamente na região do Vale do São Francisco o canavial é 100% irrigado, o que contribui para que não ocorra comprometimento da cana-de-açúcar em caso de precipitações abaixo do ideal. As Unidades de Produção ainda obtêm renda com a geração de energia elétrica e produção de composto orgânico comercializado com produtores de uva e manga da região.

O Goiás ocupa a segunda colocação nacional em área plantada e produção de cana-de-açúcar, quarto maior produtor de açúcar e segundo maior produtor de etanol, tanto de anidro quanto de hidratado. Essa posição de destaque no cenário nacional é devido ao fotoperíodo adequado à cana-de-açúcar, ou seja, a planta recebe as horas de iluminação necessária para ter um bom desenvolvimento vegetativo, índices pluviométricos adequados e relevo e topografia que auxiliam na mecanização da lavoura e com isso, uma redução nos custos com mão de obra. Ano após ano o estado vem se consolidando como um dos líderes nacionais na produção de etanol e açúcar, fator este que faz o setor sucroalcooleiro goiano como uma das principais fontes empregadoras no estado e geradoras de divisas.

Na Paraíba o uso da irrigação na cultura vem sendo ampliada para garantir a manutenção da produtividade mais regular em razão da má distribuição pluviométrica no período de desenvolvimento e maturação da cana-de-açúcar, com isso, não tem ocorrido a venda do excedente de energia elétrica produzido, uma vez que está sendo usada para alimentar o sistema de irrigação. O estado tem como particularidade seu clima definido em dois períodos: o de seca e o de chuva.

Pernambuco possui atualmente dezoito Unidades de Produção em operação. A colheita da cana-de-açúcar no Nordeste, no caso específico de Pernambuco, tem início a partir da segunda quinzena de setembro e se estende até abril do ano subsequente.

O Mato Grosso do Sul passou a integrar o mercado canavieiro entre as décadas de 1970 e 1980, período em que várias unidades agroprocessadoras financiadas foram implantadas pelo Pró-Álcool (DOMINGUES E THOMAS JUNIOR, 2012). Há atualmente mais de vinte Unidades industriais com atividades agrícolas. Destas, duas não dispõem de atividades industriais no estado, e, por isso, a cana-de-açúcar é enviada para processamento em São Paulo. A cultura da cana necessita basicamente de três fatores para o seu crescimento e desenvolvimento: fotoperíodo, temperatura e água. Enquanto o fotoperíodo e a temperatura tendem a ser variáveis mais estáveis durante os

diferentes meses dos anos no Mato Grosso do Sul, as precipitações são menos previsíveis, haja vista que as chuvas são irregulares no tempo e espaço (CONAB, 2015a).

3.2 Balanço de radiação

O Sol é a fonte primária de toda a energia disponível para os processos naturais ocorrentes na superfície da Terra. Segundo Pereira et al (2002), a radiação solar é o principal elemento meteorológico, pois condiciona todos os outros elementos como a temperatura, a umidade, a pressão, o vento e a chuva. Ao penetrar na atmosfera, sofre uma série de processos que a modificam. Uma parte da radiação incidente é refletida pelas nuvens e difusamente espalhada pela atmosfera, outra porção é absorvida pelos gases do efeito estufa, ozônio, vapor d'água e dióxido de carbono. Apenas uma parte atinge diretamente a superfície da Terra.

O balanço de radiação, também conhecido por saldo de radiação ou radiação líquida consiste no balanço entre as entradas e saídas dos fluxos radiativos entre a superfície e a atmosfera, e pode ser medido ou estimado com base nos componentes da radiação solar de ondas curtas (K^*), incidente e refletida e da radiação de ondas longas (L^*) emitida pela superfície e pela atmosfera, o qual pode ser escrito como:

$$Rn = (K^* + L^*) \quad (1)$$

Sendo representados, respectivamente, os termos do balanço de radiação de ondas curtas e de ondas longas como:

$$K^* = (K \downarrow - K \uparrow) \quad (2)$$

$$L^* = (L \downarrow - L \uparrow) \quad (3)$$

Por fim, o balanço de radiação é dado por:

$$Rn = (K \downarrow - K \uparrow) + (L \downarrow - L \uparrow) \quad (4)$$

Em que R_n é o Saldo de radiação; $K \downarrow$ a Radiação de onda curta incidente; $K \uparrow$ a Radiação de onda curta refletida; $L \downarrow$ a Radiação de onda longa incidente; $L \uparrow$ a Radiação de onda longa emitida.

O saldo de radiação indica, portanto, se está ocorrendo aquecimento ou resfriamento líquido, isto é, normalmente ele é negativo à noite, indicando resfriamento, mas, durante o dia, ele pode ser negativo ou positivo dependendo do balanço de radiação incidente e refletida.

Esse balanço na interface superfície-atmosfera é a principal fonte de energia a ser repartida no aquecimento do ar (H), do solo (G), no processo evapotranspirativo (λE), na fotossíntese (F) e convertida em fitomassa (M), podendo essas duas últimas serem negligenciadas sem acarretar erro substancial, uma vez que a quantidade de energia utilizada na fotossíntese raramente chega a 3%, pois é um processo de baixíssima eficiência de conversão de energia, assim como a energia convertida em fitomassa (PEREIRA et al. 2013).

$$R_n = H + G + \lambda E + F + M \quad (5)$$

$$R_n = H + G + \lambda E \quad (6)$$

As medidas dos componentes do balanço de radiação e de energia em condições de campo têm aplicabilidade direta em práticas agrícolas, principalmente no planejamento racional da irrigação, no uso adequado do solo, no zoneamento agrícola regional, no impacto das variações meteorológicas sobre os cultivos agrícolas, na proteção de plantas, entre outros (ANDRÉ et al. 2010). Exerce um papel fundamental nos métodos que estimam a evapotranspiração, que é o principal componente do ciclo hidrológico, essencial ao cálculo do balanço hídrico e em programas de irrigação, estudos climatológicos, hidrometeorológicos e meteorológicos (SILVA, 2009).

Devido à sua importância para o desenvolvimento das culturas, caracterização do microclima da vegetação e especialmente na estimativa da perda de água da cultura pela evapotranspiração que o estudo dos componentes do balanço de radiação tem sido objeto de vários trabalhos de pesquisa no sentido de quantificá-los para vários tipos de superfícies vegetadas, como: Oliveira e Moraes (2013), na estimativa dos componentes do balanço de radiação em duas regiões do estado de Rondônia (sudoeste da Amazônia brasileira); André et al. (2010), na análise da magnitude dos termos do balanço de

radiação e dos parâmetros derivados desse balanço, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar, no município de Campos dos Goytacazes, RJ; Liberato e Cardoso (2006), com análises das variações diárias dos termos do balanço de radiação em áreas de floresta e pastagem na Amazônia, para diferentes coberturas de nuvens; Alves e Azevedo (1997), com melão; André (1996), com a cultura do milho; Alves e Azevedo (1997), com melão e Pinheiro et al. (1994), com trigo.

Ou seja, é de grande importância em estudos relacionados às trocas de energia e massa entre a superfície terrestre e a atmosfera, muito embora não seja medido rotineiramente nas redes de estações meteorológicas. Nesse sentido, o uso de imagens orbitais na última década tem sido cada vez mais utilizado na sua determinação.

3.3 Evapotranspiração

Segundo Allen et al. (1998) a evaporação é o processo por meio do qual a água é convertida da fase líquida para a fase de vapor (vaporização), e ocorre em superfícies evaporantes como, oceanos, lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação úmida (evaporação do orvalho e da chuva interceptada pela copa das árvores). Enquanto que transpiração é a perda de água na forma de vapor pelas plantas, principalmente através das folhas, embora possa ocorrer perda em plantas lenhosas pelas lenticelas (PEREIRA et al. 2002).

Quando ambos os processos ocorrem simultaneamente, como ocorre em uma cultura vegetal, utiliza-se o termo evapotranspiração, ou seja, é o fenômeno combinado entre a evaporação d'água do solo e das superfícies líquidas com a transpiração dos vegetais e, que segundo Pereira et al. (2013) foi proposto pelo climatologista Thornthwaite em meados de 1930.

A ET em uma área com vegetação em crescimento ativo, sem deficiência nutricional, e sem ataque de pragas e moléstias é condicionada pela disponibilidade de energia solar (depende do local e da época do ano), pelas características da vegetação (coloração, ciclo de cultivo, área foliar, arquitetura das plantas e espessura das folhas), e pela interação da demanda atmosférica com o suprimento de água do solo às plantas (PEREIRA, et al. 2013).

Com a finalidade de padronizar a evapotranspiração de comunidades vegetais, foram fixadas as condições nas quais sua medida deve ser feita. Foi então que surgiu o

termo evapotranspiração de referência (ET_o), que é a quantidade de água evapotranspirada, por uma cultura de baixo porte (normalmente gramado) em crescimento ativo, verde, cobrindo totalmente o solo, com altura uniforme (entre 8 e 15cm (IAF \approx 3) e coeficiente de reflexão (albedo) da radiação solar ao redor de 23%, e sem restrição hídrica. Nesse caso a ET depende apenas das variáveis meteorológicas, sendo portanto ET_o uma variável meteorológica, que expressa o potencial de evapotranspiração para as condições meteorológicas vigentes (PEREIRA et al, 2002). Seu valor é adotado como referência para estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) mediante um coeficiente de cultura K_c. Existe ainda outros termos usados para evapotranspiração a depender do tipo de vegetação, do tamanho da área vegetada e do suprimento de água pelo solo, tais como, potencial, real, de oásis, e de cultura.

Em pequena escala a ET define o consumo hídrico de culturas ou de bacias hidrográficas e em escala global define o clima e o equilíbrio energético do planeta. Desta forma, quantificar esses fluxos permite estabelecer estratégias de manejo dos recursos hídricos e edáficos de forma racional e sustentável (FERREIRA, 2014). Silva, 2009 menciona que para se ter bons resultados na irrigação a ET deve ser bem quantificada. Pois, regas em quantidades insuficientes repõem a água apenas nas camadas superficiais do solo, não umedecendo toda a zona das raízes fazendo com que elas se tornem superficiais e incapazes de explorar o volume de solo disponível. Ademais, agravam os problemas de salinização do solo nas zonas áridas e semiáridas, intensificados pelo emprego de água com alto teor de sais. Em contra partida, regas excessivas também são contra indicadas, pois acarretam perdas de água e de nutrientes, pela percolação abaixo da zona das raízes, além de favorecer a proliferação de microorganismos patogênicos. Em casos de terrenos mal drenados, com impedimentos a percolação, o solo ficara saturado prejudicando as raízes que poderão perecer por falta de arejamento.

Nesse sentido, diversos métodos foram desenvolvidos para quantificação da ET, dentre os quais podemos destacar o método direto através do uso de lisímetros (pesagem, drenagem ou lençol freático constante), métodos de perfil atmosférico (balanço de energia, razão de bowen), que utilizam medidas que caracterizam as condições de temperatura, concentração de vapor, e da velocidade do vento em duas alturas imediatamente acima da superfície, (PEREIRA, et al. 2013). Uma limitação destas técnicas segundo Tasumi, (2003) é que elas essencialmente produzem valores de evaporação pontuais ou para pequenas áreas, e são aplicáveis para uma área

relativamente homogênea ao redor do equipamento de medida da ET, o qual está exposto aos fatores ambientais.

O método micrometeorológico do Balanço de Energia pela Razão de Bowen (BERB) é um método relativamente prático e confiável. Tem sido frequentemente usado para estimar a ET de diferentes sistemas solo/vegetação em diferentes condições climáticas (BEZERRA et al., 2012; 2015). De acordo com Pereira et al. (2013), o balanço de energia explica o destino dado à fração de energia disponível para o sistema, sendo o (R_n) distribuído entre os fluxos não-radiativos a superfície do solo, ou seja, baseia-se na equação simplificada do balanço de energia, onde a energia disponível no sistema (R_n) é utilizada basicamente para aquecimento do ar, sob forma de calor sensível (H), no processo evapotransporativo, sob a forma de calor latente (LE) e para aquecimento do solo, sob a forma de fluxo de calor no solo (G).

O método adota os princípios da existência de estabilidade na atmosfera; transporte de calor e massa unidirecional, na direção vertical, com igualdade dos coeficientes de difusão turbulenta de calor e vapor d'água (LEE et al., 2004; FRITSCHEN e FRITSCHEN, 2005). A partir dessas suposições Bowen formulou uma razão entre o fluxo de calor por condução, ou calor sensível (H), utilizado no aquecimento do ar, e o fluxo de calor destinado a evapotranspiração, ou calor latente (LE), conhecida como Razão de Bowen β (FRITSCHEN e FRITSCHEN, 2005). Determinando-se R_n (Balanço de radiação), H (Calor sensível) e G (fluxo de calor no solo), a energia utilizada no processo evapotransporativo (LE) é obtida como resíduo da equação.

A Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO) recomenda o uso da equação de Penman e Monteith (FAO) para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) (ALLEN et al. 1998, 2006b). Este método é o mais utilizado no mundo, e tem sido preciso para estimar ET_o em diferentes climas (ALLEN et al., 1998). Porém, requer várias medições de variáveis climáticas, como temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento e, infelizmente, há um número limitado de locais em todo o mundo onde estações meteorológicas completas são instaladas para as medições de rotina destas variáveis climáticas (SAMANI et al. 2011). Além de exigir condições específicas que nem sempre são atendidas.

Esta falta de dados meteorológicos leva ao desenvolvimento de abordagens mais simples para estimar ET_o que requerem apenas alguns parâmetros climáticos. Neste contexto, vários métodos empíricos são citados na literatura para estimar ET_o . Alguns

destes métodos são baseados em uma única variável climática, isto é, radiação solar (Jensen-Haise, Makkink, Blaney-Criddle, Priestley-Taylor) ou na temperatura (Thornthwaite, Camargo, Hargreaves-Samani) (PEREIRA, 2013).

3.4 Sensoriamento remoto

Segundo Pereira et al, (2013) é possível estimar a evapotranspiração sob condições padronizadas de maneira eficaz através de diversos métodos. Porém, os resultados dos dados são representativos para pequenas áreas ao redor do local das medidas agrometeorológicas. Quando se deseja estimar a ET em escala regional ou global as técnicas baseadas em sensores orbitais são mais apropriadas devido à grande cobertura espacial das imagens.

Ainda de acordo com o autor supracitado algumas características dos sensores devem ser levadas em consideração, a depender do tipo de informação que se pretende obter dos alvos de interesse, como: a resolução espectral (quantidade de bandas), resolução radiométrica (número de valores digitais), resolução espacial (tamanho do pixel) e a resolução temporal (tempo de revisita).

Existem vários algoritmos que podem ser utilizados para a estimativa da ET com uso do sensoriamento remoto. O SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) é um deles. Para alimentar o algoritmo são necessária imagens de satélite e alguns elementos meteorológicos observados à superfície na hora da passagem do satélite, apenas, velocidade do vento, umidade e temperatura do ar. Por isso, é uma excelente opção para regiões que não possuem dados meteorológicos adequados ou suficientes (PEREIRA et al, 2013).

De acordo com Allen et al. (2007) o algoritmo se destaca por não necessitar de correção atmosférica das informações em comprimento de onda curta e térmica nas imagens, desde que ET estimada dependa apenas das diferenças de temperatura radiométrica na cena em vez do valor absoluto da temperatura de superfície.

Ademais, é constituído, quase que totalmente, por parametrizações físicas bem estabelecidas e pouco complexas. Segundo Bastiaanssen, (1995) essas parametrizações foram confrontadas com dados de campo em diferentes partes do mundo, apresentando resultados promissores. A parametrização do algoritmo é aplicada em imagens digitais de qualquer sensor orbital que efetue medidas de radiância no visível, infravermelho

próximo e termal, tais como o Landsat 5 - TM (SANTOS et al, 2011); NOAA-AVHRR (PAIVA et al., 2011); Terra/MODIS; (RUHOFF et al., 2012) e Terra/ ASTER (SANTOS et al., 2011).

De acordo com Leite, (2011) o sensoriamento remoto é uma ferramenta que se destaca de maneira singular, já que o sensor capta e fornece dados que servem de suporte a vários estudos sobre a superfície da terra, sobretudo quanto a possibilidade de obtenção de informações temporais, ou seja, informações históricas, permitindo o mapeamento e quantificação de informações pretéritas e atuais das áreas imageadas.

Portanto, as principais vantagens da obtenção de dados via SR orbital é o baixo custo, a possibilidade de coleta de informações detalhadas para uma extensa área em tempo relativamente curto; quantificação de parâmetros físicos da superfície terrestre com um fluxo quase contínuo de dados com alta resolução temporal e espacial e a possibilidade de confrontar um cenário passado com um atual. Sua limitação está associada a presença de nuvens que compromete total ou parcialmente o trabalho com as imagens. Por isso, tem sido alvo de muitos estudos como os realizados por: Bezerra et al. (2014) na estimativa da Eto diária para Mossoró, Silva et al. (2012) no estudo da evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do semi-árido brasileiro; Bezerra et al. (2008) na estimativa da evapotranspiração real diária em imagens Landsat – TM; Silva et al. (2005) em um estudo abrangendo parte do estado de Pernambuco e Bahia utilizando dados TM/Landsat 5.

3.5 Sensor MODIS e seus produtos

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), é o principal instrumento das plataformas orbitais Terra e Aqua, que foram lançadas com o intuito de estudar os processos de mudanças climáticas, dentro do programa internacional denominado EOS (*Earth Observing System*), liderado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). O mesmo dispõe de 36 bandas (resolução espectral) com cobertura espectral de 0,4 a 14,40 μm , resolução radiométrica de 12 bits, resolução espacial de 250 (bandas 1-2), 500 (bandas 3-7) e 1.000 m (bandas 8-36) e resolução temporal diária (NASA, 2015).

O satélite Terra possui uma órbita cronometrada para passar de norte a sul do planeta ao longo da linha do equador no período da manhã, com horário de passagem às

10h e 30min enquanto o satélite Aqua passa do sul ao norte durante o período da tarde às 13h e 30min, ambas as passagens no horário de Brasília. Há vários produtos elaborados com base nas medições da radiância de suas 36 bandas espectrais, muitos dos quais são disponibilizados em mosaicos (*tiles*) correspondentes a uma área georreferenciada com lados de 1.200 x 1.200 km (OLIVEIRA et al., 2014).

A maioria dos produtos MODIS Terra utiliza projeção Sinusoidal, que consiste em um sistema grades (quadrados não sobrepostos e adjacentes), eles são divididos em *tiles* fixos de aproximadamente 10° x 10°. Para cada quadrado é atribuído um (H) horizontal e (V) vertical de coordenadas, que varia de 0 a 35 e 0 a 17, respectivamente.

As informações e descrições sobre os produtos MODIS estão disponíveis através do LP DAAC. Seus dados são todos armazenados em HDF (*Hierarchical Data Format*), que é o formato padrão para guardar o modelo de dados implementado pela EOS a partir de estudos realizados pela NASA. Esses arquivos seguem uma convenção de nomenclatura que dá informações úteis sobre o produto (grânulos) específico. O Prefixo **MOD** é usado para arquivos provenientes do satélite Terra, enquanto que **MYD** designa os produtos da plataforma Aqua e **MCD** quando os produtos são provenientes dos dois satélites. Por exemplo, o nome do arquivo MOD09A1.A2006001.h08v05.005.2006012234657.hdf indica:

MOD09A1 = Identificação da plataforma e número do produto

.A2006001 = Ano de aquisição 2006 e dia Juliano 001

.h08v05 = Identificação do Tile (horizontal08 vertical05)

005 = Versão de processamento

,2006012234657 = Data e hora do processamento (YYYYDDHHMMSS)

.hdf = Formato de Dados (HDF-EOS)

Os dados MODIS, assim como os demais instrumentos a bordo das plataformas Terra e Aqua, são transferidos para estações terrestres em *White Sands*, no estado Americano do Novo México, através do sistema via satélite de retransmissão de Rastreamento de Dados (TDRSS - *Tracking and Data Relay Satellite System*). Os dados são então enviados para EOS (EDOS - *Data and Operations System*) onde ocorre o processamento que é dividido em cinco níveis (0 a 4). Os produtos de níveis mais elevados são produzidos pelo MODAPS (*MODIS Adaptive Processing System*), em seguida, são distribuídos em três outros centros DAACs.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi conduzido em área de produção comercial de cana-de-açúcar irrigada pertencente à empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A (Agrovale) (latitude 09°27'11" S; longitude 40°19'58" O e altitude de 396 m), no município de Juazeiro-BA (Figura 1). A área estudada está localizada à margem direita do Rio São Francisco, no extremo norte da Bahia, na zona do submédio São Francisco, fazendo divisa com o estado de Pernambuco, e ligada a Petrolina pela Ponte Presidente Dutra, com classificação climática segundo Koppen BSw'h', semiárido quente, com chuvas de verão e período seco bem definido no inverno.

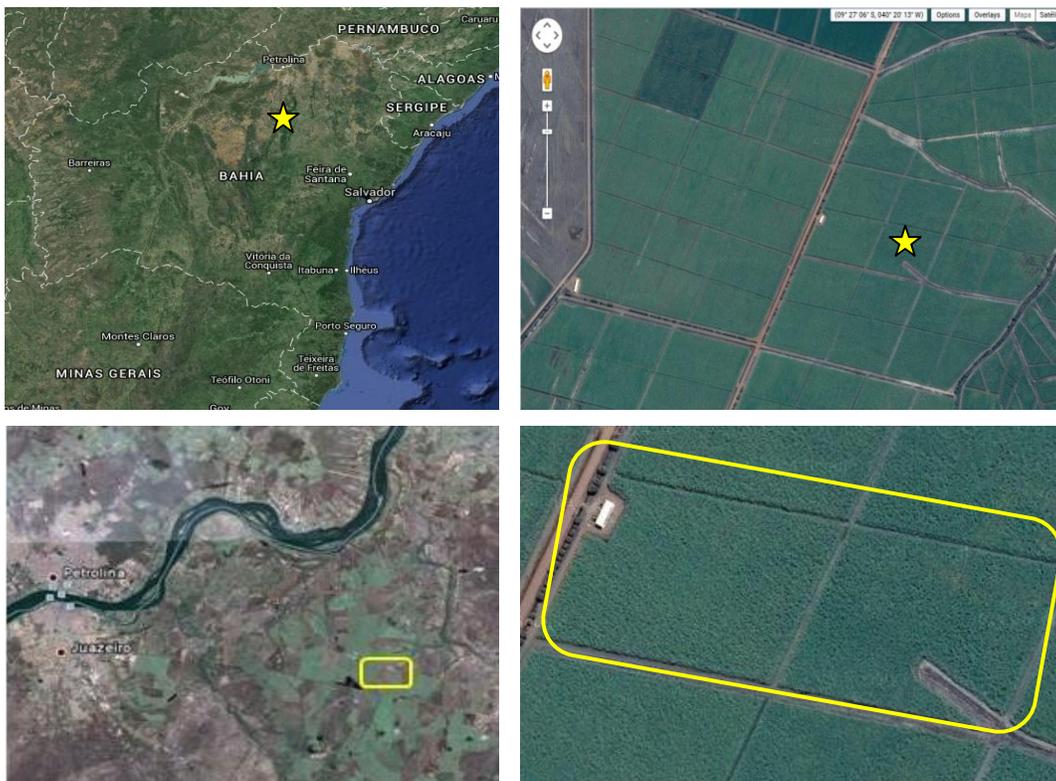


Figura 1 - Localização da área experimental na Usina Agrovale, Juazeiro, BA.
Fonte: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

A temperatura média da região é de 27,4°C, a pluviosidade média anual de 673,9 mm e a umidade relativa média de 68,9%. Por estar inserida na bacia do São Francisco a

região apresenta elevado potencial hídrico, porém não há excedente hídrico no solo, o que impõe a necessidade de realização de irrigação suplementar.

A usina apresenta aproximadamente 20.000 ha de cana-de-açúcar irrigada, prevalecendo a irrigação superficial. A disponibilidade hídrica da região, devido a sua proximidade do rio São Francisco, favorece ao cultivo irrigado. Toda a produção é processada na própria região, sendo destinada a produção de açúcar e álcool anidro.

O estudo ocorreu em cultivo da cana-de-açúcar, cana-planta. A variedade de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* ssp) trabalhada na área de estudo foi a RB 92579, principal variedade explorada pela empresa e na região Nordeste do país, cultivada em um Vertissolo em espaçamento duplo de 1,2 m por 0,6 m, irrigada por gotejamento subsuperficial, com 28 gotejadores enterrados a 0,20 m da superfície do solo.

4.2 Dados micrometeorológicos

O plantio ocorreu no vigésimo segundo dia do mês de outubro do ano de 2009 e a colheita no décimo oitavo dia do mês de novembro de 2010. A coleta de dados micrometeorológicos foi realizada a partir do dia 06 de novembro de 2009, 15 dias após o plantio, tempo necessário à instalação da torre micrometeorológica, se estendendo até o dia 3 de novembro de 2010, período em que a torre foi retirada para a colheita, compreendendo 356 dias de coleta de dados.

A torre micrometeorológica foi instalada no centro da parcela de cultivo, esta foi equipada por um Saldo radiômetro, modelo CNR1 (Kipp e Zonen (Campbell Scientific INC, Logan, Utah, USA), para medida das quatro componentes do balanço de radiação: radiação solar de onda curta incidente (K_{\downarrow}), radiação solar de onda curta refletida pelo cultivo (K_{\uparrow}), radiação de onda longa incidente proveniente da atmosfera (L_{\downarrow}) e radiação de onda longa emitida pela cultura (L_{\uparrow}). Foram instalados 2 sensores para o cômputo do fluxo de calor no solo (Modelo HFT3, marca Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah, USA), localizados entre e dentro das fileiras a 2 cm de profundidade. Foram instalados, também, dois psicrômetros com manutenção realizada semanalmente com alturas variando de acordo com o desenvolvimento da cultura. Os dados de precipitação foram obtidos a partir de um pluviômetro modelo CS700-L (Hydrological Services Rain Gage, Liverpool, Austrália), instalado no topo da torre micrometeorológica. A leitura e

armazenamento dos dados foram realizados por meio de um sistema de aquisição de dados do tipo datalogger CR23X (Campbell Scientific INC, Logan, Utah, USA), programado para realizar leituras a cada 5 segundos, armazenando valores médios a cada 15 minutos, conectado a uma placa multiplexadora modelo AM16/32 (Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA).

4.3 Dados orbitais

Foram utilizadas quatro imagens MODIS/TERRA, uma para cada fase fenológica da cultura da cana-de-açúcar como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Descrição das datas das imagens com as fases fenológicas, duração, dia após o planto e dia seqüencial do ano.

Fase fenológica	Duração	Data das imagens	DAP	DAS
Fase 1 (brotação e emergência)	30	09/11/2009	18 dias	313
Fase 2 (perfilhamento e estabelecimento da cultura)	66	09/12/2009	48 dias	343
Fase 3 (crescimento e desenvolvimento dos colmos)	186	11/03/2010	140 dias	70
Fase 4 (maturação)	104	03/10/2010	346 dias	276
Ciclo	386 dias			

Para aquisição das imagens foi levado em consideração a disponibilidade de dados de superfície e ausência (ou mínima presença) de nebulosidade. Os dados/produtos utilizados foram disponibilizados sem nenhum custo pela NASA EOSDIS *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, disponível no site <https://lpdaac.usgs.gov/>. Neste trabalho as imagens corresponderam ao *Tiles h14v09* como mostra a Figura 2.

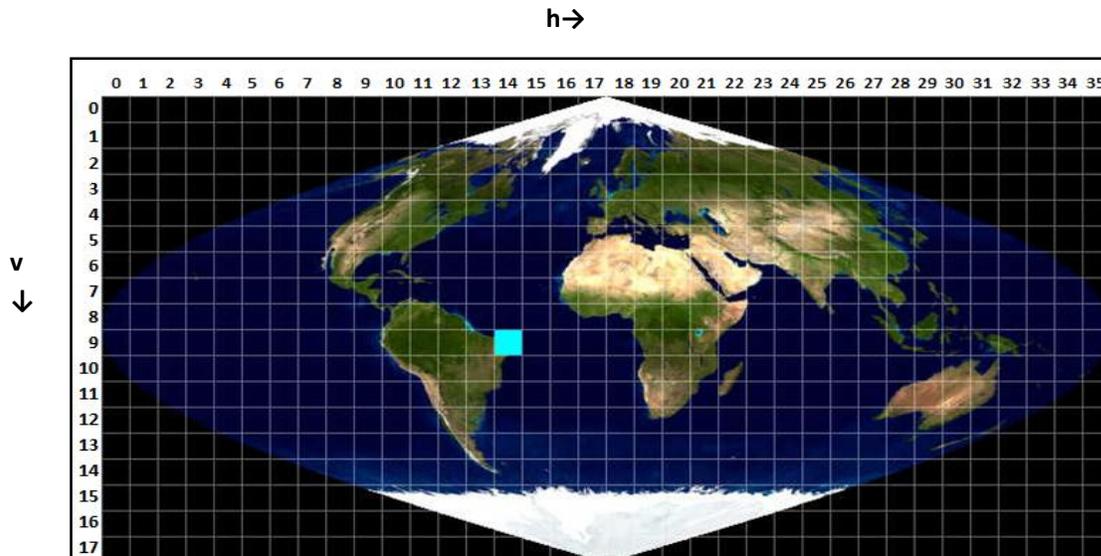


Figura 2: Representação do *tiles* h14v09.

Fonte: Adaptado do *MODISReprojection Tool*.

Inicialmente os dados MODIS/TERRA foram tratadas em um programa específico desenvolvido pela NASA, disponível gratuitamente, MRT (*MODISReprojection Tool*) mostrado na Figura 3 e disponibilizado no endereço (https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool), onde os dados foram reprojitados para coordenadas geográficas, datum *WorldGeodetic System 84* (WGS84) e convertidos do formato Hdf para Geotiff, no mesmo programa foi realizada, também, a reamostragem dos *pixels* dos produtos MOD09GA (reflectância da superfície e ângulo zenital solar) e MOD11A1 (Temperatura da superfície) para 250 m, de modo a padronizar a resolução espacial das estimativas para posterior processamento.

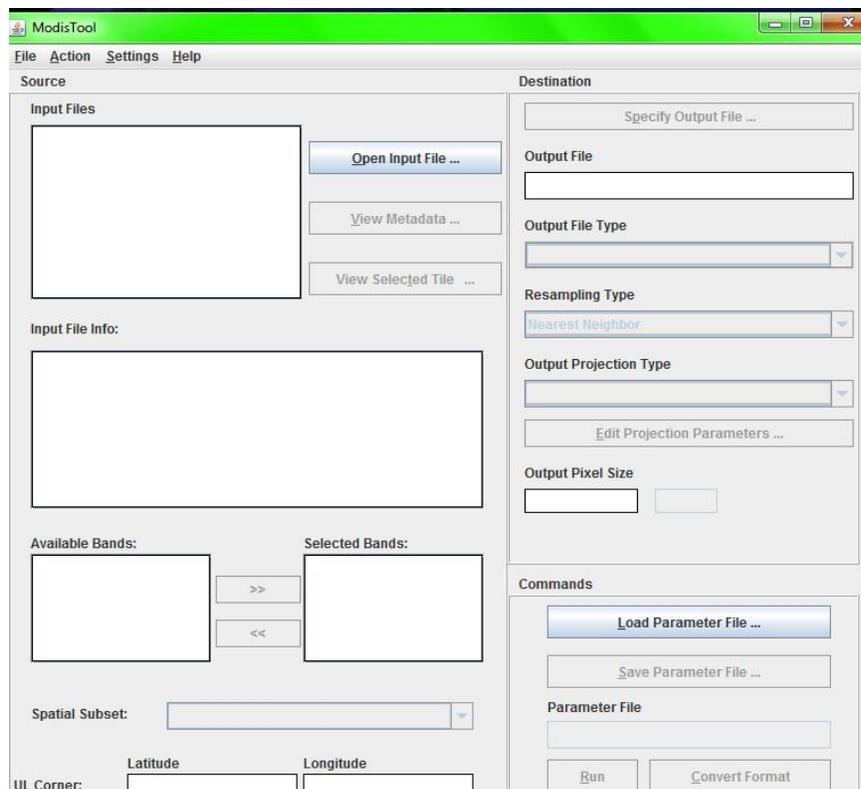


Figura 3 – MRT, para conversão de dados HDF para HDR ou GEOTIFF e reamostragem.

Os produtos MODIS utilizados estão presentes na Tabela 2, com os fatores de correção que são necessários para a conversão dos valores originais em dados de temperatura (K), reflectância dentre outros.

Tabela 2: Descrição dos produtos MODIS utilizados.

Produto	Descrição	Fator multiplicativo	Resolução espacial	Unidades
MOD09GQ	Reflectância da superfície	0,0001	250 m	Reflectância
MOD09GA	Reflectância da superfície	0,0001	500 m	Reflectância
	Ângulo zenital solar	0,01	1 km	Grau
MOD11A1	Temperatura da superfície	0,02	1 km	Kelvin
	Hora da passagem do satélite	0,1	1 km	Hora

Fonte: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table

4.4 Balanço de Radiação – Sensoriamento Remoto

O balanço de radiação para o momento da passagem do sensor MODIS/TERRA foi estimado partindo-se dos valores de reflectância *in-band* da superfície contidos nos dados/produtos conforme descrito a seguir (BASTIAANSSEN, 1995):

$$Rn = (1 - \alpha_s)K \downarrow + L \downarrow - L \uparrow - (1 - \epsilon_s)L \downarrow \quad (7)$$

Em que Rn é o balanço de radiação na superfície ($W m^{-2}$), α_s é o albedo da superfície, $K \downarrow$ representa a radiação solar incidente na superfície ($W m^{-2}$), $L \downarrow$ é a radiação de onda longa incidente na superfície ($W m^{-2}$), $L \uparrow$ é a radiação de onda longa emitida pela superfície ($W m^{-2}$) e ϵ_s é a emissividade da superfície.

A estimativa do albedo da superfície foi realizada através do modelo proposto por Tasumi et al. (2008), calculado como uma média ponderada das reflectâncias das bandas 1 a 7 do sensor MODIS (Equação 8). O peso atribuído a cada banda consta na Tabela 3 e representa a fração de toda a radiação solar de onda curta que chega à superfície da Terra que está compreendida no intervalo espectral da mesma (TASUMI et al., 2008).

$$\alpha = \left(\sum_{b=1}^7 [\rho_b \cdot w_b] \right) + cte \quad (8)$$

Em que ρ_b é a reflectância de cada banda do sensor MODIS, w_b é o respectivo peso na média ponderada e “cte” é um fator de ajuste constante somado à média ponderada.

Tabela 3: Pesos atribuídos às bandas do sensor MODIS no cálculo do albedo de superfície segundo o modelo Tasumi et al. (2008).

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Cte
Tasumi	0,215	0,215	0,242	0,129	0,101	0,062	0,036	-

Para o cálculo da emissividade da superfície, primeiramente foi necessário calcular três índices de vegetação: o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e o índice de área foliar (IAF).

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foi obtido através da razão entre a diferença das reflectâncias nas faixas do infravermelho próximo (IV) e do vermelho (V) pela soma das mesmas. O NDVI é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a +1 e para superfícies com alguma vegetação o NDVI varia de 0 e 1, já para a água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero.

$$NDVI = \frac{\rho IV_2 - \rho V_1}{\rho IV_2 + \rho V_1} \quad (9)$$

Em que ρ_1 e ρ_2 são as reflectâncias nas bandas 1 e 2 do sensor MODIS.

Para o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) (Huete, 1988), que é um índice que busca amenizar os efeitos do “background” do solo do NDVI, foi utilizado a Equação 10:

$$SAVI = (1 + \delta) \frac{\rho IV_2 - \rho V_1}{\delta + \rho IV_2 + \rho V_1} \quad (10)$$

Em que ρIV é a reflectância na banda do infravermelho próximo, ρV é a reflectância na banda do vermelho e δ é uma constante de ajuste em função do tipo de solo, cujo valor mais comumente referenciado é 0,5 (Huete 1988; Boegh et al. 2002). Portanto, também foi adotado nesta pesquisa.

Após o cálculo do NDVI e do SAVI, calculou-se o Índice de Área Foliar (IAF), que é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e o mesmo foi computado pela seguinte equação empírica obtida por Allen et al. (2010):

$$\begin{aligned}
\text{Para } SAVI \leq 0,817 & \quad IAF = 11 * SAVI^3 \\
\text{Para } SAVI > 0,817 & \quad IAF = 6
\end{aligned}
\tag{11}$$

Assim sendo, para o cômputo da emissividade da superfície a partir dos índices de vegetação, Allen *et al.* (2002) propuseram a aplicação da equação 12. Porém, só é válida para os *pixels* que apresentarem NDVI maior que zero. Para os *pixels* com NDVI negativo, será $\varepsilon_S = 0,985$ (Allen *et al.* 2002).

$$\varepsilon_S = 0,95 + 0,01 * IAF \tag{12}$$

A radiação solar incidente foi calculada através da expressão:

$$K \downarrow = \tau S_0 \left(\frac{dn}{d} \right)^2 \cos \theta_z \tag{13}$$

Em que S_0 corresponde a constante solar (1367 W m^{-2}), θ_z o ângulo zenital solar em (radianos), obtido do produto MOD09GA, dn e d são, respectivamente, as distâncias média e instantânea entre a Terra e o Sol e τ corresponde a transmitância da atmosfera no instante da passagem do satélite.

O cálculo da transmitância atmosférica se deu de acordo com Allen *et al.* (2007):

$$\tau = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z \tag{14}$$

Em que z é a altitude (m) no *pixel* da torre micrometeorológica utilizada para entrada de dados do SEBAL.

A radiação de onda longa incidente na superfície foi computada a partir da equação de Stefan-Boltzmann (Santos *et al.* 2011):

$$L \downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (15)$$

Em que ε_a é a emissividade da atmosfera, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) e T_a é a temperatura do ar próxima à superfície obtida na torre (K).

Como visto na Equação 15, um dos termos que se insere na equação de Stefan-Boltzmann é a emissividade da atmosfera, que neste estudo foi assim calculada:

$$\varepsilon_a = 0,85((- \ln \tau)^{0,09}) \quad (16)$$

O cômputo da radiação de onda longa emitida pela superfície foi obtida utilizando-se a equação de Stefan-Boltzmann:

$$L \uparrow = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (17)$$

Em que T_s (K) é a temperatura da superfície, obtida do produto MOD11A1.

Após os procedimentos para a obtenção do balanço de radiação para o instante da passagem do satélite, calculou-se o balanço de radiação médio diário a partir da equação de Slub (BRUIN 1987).

$$Rn_{24H} = (1 - \alpha_s)K \downarrow_{24H} - 110\tau \quad (18)$$

Em que $K \downarrow_{24H}$ é a média diária de radiação solar incidente na superfície (W m^{-2}) e 110 é um valor constante, expresso em W m^{-2} .

4.5 Validação das estimativas

De forma a avaliar a concordância entre os valores observados e modelados foram calculados o viés (VS) e o erro relativo (ER), descritos de acordo com as Equações 19 e 20.

$$VS = (F_{mod} - F_{obs}) \quad (19)$$

$$ER = 100 \left(\frac{|F_{mod} - F_{obs}|}{F_{obs}} \right) \quad (20)$$

Em que F_{mod} representa a medida do fluxo estimada pelo modelo SEBAL e F_{obs} representa a medida observada no *pixel* da torre micrometeorológica.

4.6 Determinação da evapotranspiração

A necessidade hídrica da cultura da cana-de-açúcar foi determinada através do Balanço de Energia com base na Razão de Bowen e através da equação de Penman-Monteith sugerido pela FAO-56 para os dias estudados. Sendo que para a equação de Penman foi determinado dois valores de evapotranspiração; um para os dados observados à superfície e outro aplicando o Rn_{24h} estimado através do SEBAL.

Na estimativa da evapotranspiração com base na Razão de Bowen parte-se do princípio que o balanço de energia expressa a conversão de energia em fluxos de massa e de calor sobre a cultura (Equação. 6) (Perez et al., 1999; Zhang et al., 2008; Bezerra et al., 2012; 2015).

Os valores do λE e do H foram derivados a partir da equação do balanço de energia (Equação 6) e do conceito de razão de Bowen assumindo que os coeficientes de difusão turbulenta para o transporte de calor e vapor d'água são iguais (Bowen, 1926; Allen et al., 2011).

$$\lambda E = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (21)$$

$$H = \frac{Rn - G}{1 + \beta^{-1}} \quad (22)$$

Em que β é a razão de Bowen (Bowen, 1926), calculada pela equação seguinte:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (23)$$

Em que: $\Delta T = T_2 - T_1$ é o gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) entre dois níveis acima do dossel da cultura e $\Delta e = e_2 - e_1$ é o gradiente de pressão real de vapor de água (kPa) entre os mesmos dois níveis de ΔT , γ é o coeficiente psicrométrico (kPa $^{\circ}\text{C}^{-1}$), que foi calculado utilizando a equação 24.

Os referidos gradientes foram obtidos a partir das medidas das temperaturas seca e úmida medidas em dois níveis acima do dossel vegetativo (0,30 e 1,5 m) utilizando dois psicrômetros ventilados, construídos com termopares (cobre-constantan).

$$\gamma = \frac{c_p P_a}{0,622 \lambda} \quad (24)$$

Em que c_p é o calor específico do ar seco a pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), λ é o calor latente de vaporização da água (MJ kg^{-1}), o qual foi calculado pela Equação 25, e P_a é a pressão atmosférica (kPa).

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} T_a \quad (25)$$

Onde T_a é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

A ETc diária da cana-de-açúcar foi obtida a partir dos valores diários λE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (Equação 21) convertido para milímetros (mm) a partir do valor do calor latente de evaporação da água, cujo valor foi obtido pela equação 25. A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi calculada pelo método FAO-56 (Allen et al., 1998, 2006b), com base em dados coletados na torre micrometeorológica instalada no experimento.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (26)$$

Em que Rn é radiação líquida na superfície da cultura, $\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$; G é o fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$; T é a média diária da temperatura do ar a 2 m de altura, $^{\circ}\text{C}$; u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura, m s^{-1} ; e_s é a pressão da saturação de vapor, kPa; e_a é a pressão de vapor atual, kPa; $e_s - e_a$ é o déficit de saturação de vapor, kPa; Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor *versus* temperatura, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ e γ é a constante psicrométrica, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

A inclinação da curva da pressão de vapor foi determinada através da Equação 27 abaixo.

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(T + 237,5)^2} \quad (27)$$

A análise estatística realizada para comparação dos dados de ETc medidos à superfície e estimados com o Rn modelado, foi realizada através do teste de Student pareado ao nível de 5% de significância ($\alpha = 0,05$). Foi determinado, ainda, o coeficiente de correlação de Pearson entre (ETcBERB - Balanço de Energia pela Razão

de Bowen e ETCPM1 - Penman-Monteith-FAO) e (ETcBERB - Balanço de Energia pela Razão de Bowen e ETCPM2 - Penman-Monteith-FAO, usando o R_n modelado).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Comportamento dos componentes do balanço de radiação à superfície

As Figuras 4 a 7 mostram as variações diárias dos fluxos de radiação, medidos no período diurno (6h às 17h) pelas torres micrometeorológicas na área produtiva de cana-de-açúcar para quatro dias, buscando-se relacionar aos estágios do desenvolvimento da cultura (09.11.2009, 09.12.2009, 11.03.2010 e 03.10.2010), respectivamente.

Ao analisar a variação de K_{\downarrow} (Figura 4), verificou-se a interferência de nuvens ao longo do dia avaliado, caracterizando presença de nebulosidade. Especificamente, das 10h45min às 13h15min, sendo as maiores interferências observadas às 11h45min e 13h15min. Os maiores registros de K_{\downarrow} ocorreram às 11h e 12h15min, apresentando valores máximos de 1043 W m^{-2} e 1040 W m^{-2} respectivamente.

A variação de K_{\uparrow} apresentou valores máximos ocorrendo às 11h e 12h15min, acompanhando a variação de K_{\downarrow} com oscilações menos expressivas em virtude da sua baixa magnitude quando comparada aos demais componentes. A média de K_{\downarrow} e K_{\uparrow} para o período diurno foi, respectivamente de $639,72 \text{ W m}^{-2}$ e $74,88 \text{ W m}^{-2}$.

Durante o período diurno, a L_{\downarrow} foi inferior a L_{\uparrow} , apresentando valor de 399 W m^{-2} e 563 W m^{-2} , respectivamente. O R_n acompanhou as variações de K_{\downarrow} , que representa o componente de maior influência no balanço de radiação. Os máximos valores de R_n encontrados foram 737 W m^{-2} (11h) e 734 W m^{-2} (12h30min), com média diária de $418,53 \text{ W m}^{-2}$ durante os horários estudados.

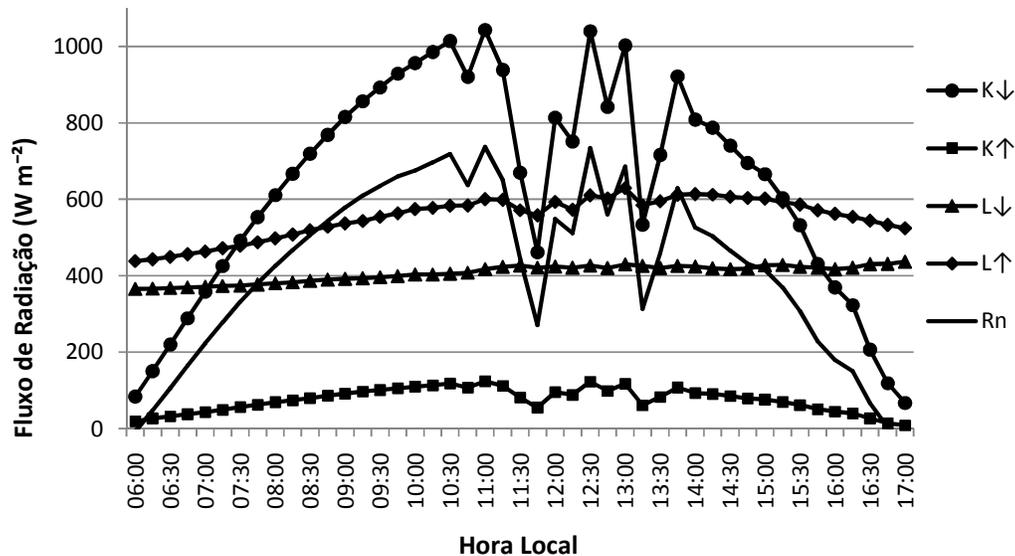


Figura 4. Medidas dos componentes do balanço de radiação durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 09/11/2009.

Para o dia 09/12/2009 (Figura 5) ao analisar a variação de K_{\downarrow} , verificou-se uma pequena interferência de nuvens às 13h45min e 14h30min, com valores de 804 W m^{-2} e 559 W m^{-2} respectivamente. O maior registro de K_{\downarrow} ocorreu às 11h30min, apresentando valor máximo de 1023 W m^{-2} . O maior registro de K_{\uparrow} ocorreu às 11h30min, apresentando valor máximo de $127,5 \text{ W m}^{-2}$, acompanhando a variação de K_{\downarrow} . A média de K_{\downarrow} e K_{\uparrow} para o período diurno foi, respectivamente de $683,05 \text{ W m}^{-2}$ e $85,98 \text{ W m}^{-2}$

Durante o período diurno, a L_{\downarrow} foi inferior a L_{\uparrow} , apresentando valor de 394 W m^{-2} e 557 W m^{-2} , respectivamente. O R_n acompanhou as variações de K_{\downarrow} , O máximo valor de R_n encontrado foi às 11h30min (708 W m^{-2}), com média diária de $445,02 \text{ W m}^{-2}$ durante os horários estudados.

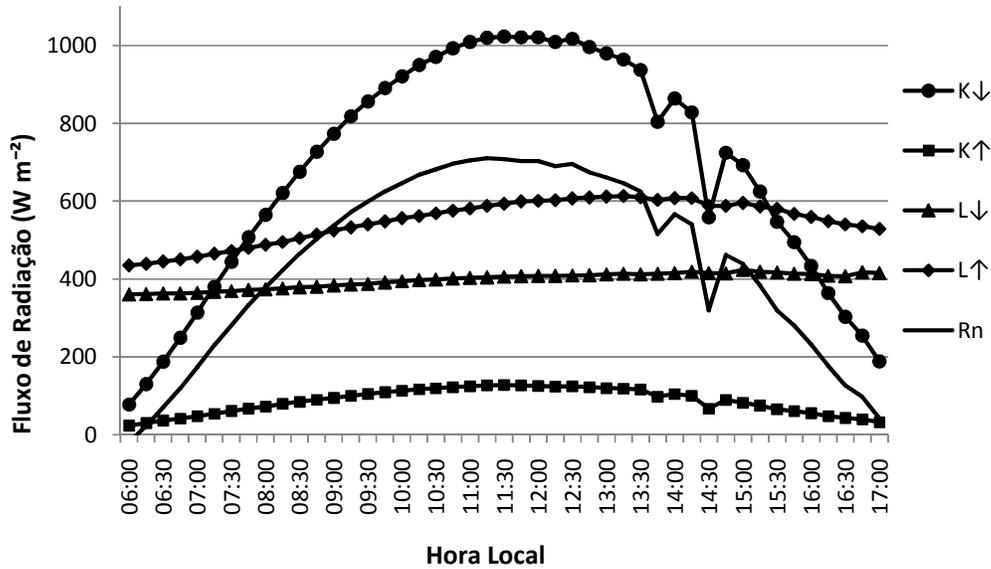


Figura 5. Medidas dos componentes do balanço de radiação durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009.

De acordo com a Figura 6 é possível observar que não houve variação de K_{\downarrow} ao longo do dia que caracterizasse nebulosidade. O maior registro de K_{\downarrow} ocorreu às 12h30min, apresentando valor máximo de 1039 W m^{-2} .

Para K_{\uparrow} o maior registro também ocorreu às 12h30min, apresentando valor máximo de $164,6 \text{ W m}^{-2}$. A média de K_{\downarrow} e K_{\uparrow} para o período diurno foi, respectivamente de $670,17 \text{ W m}^{-2}$ e $118,81 \text{ W m}^{-2}$. Durante o período diurno, a L_{\downarrow} foi inferior a L_{\uparrow} , apresentando valor de 407 W m^{-2} e 486 W m^{-2} , respectivamente. O R_n acompanhou as variações de K_{\downarrow} . O máximo valor de R_n encontrado foi às 12h30min (795 W m^{-2}) com média diária de $476,2 \text{ W m}^{-2}$ durante os horários estudados.

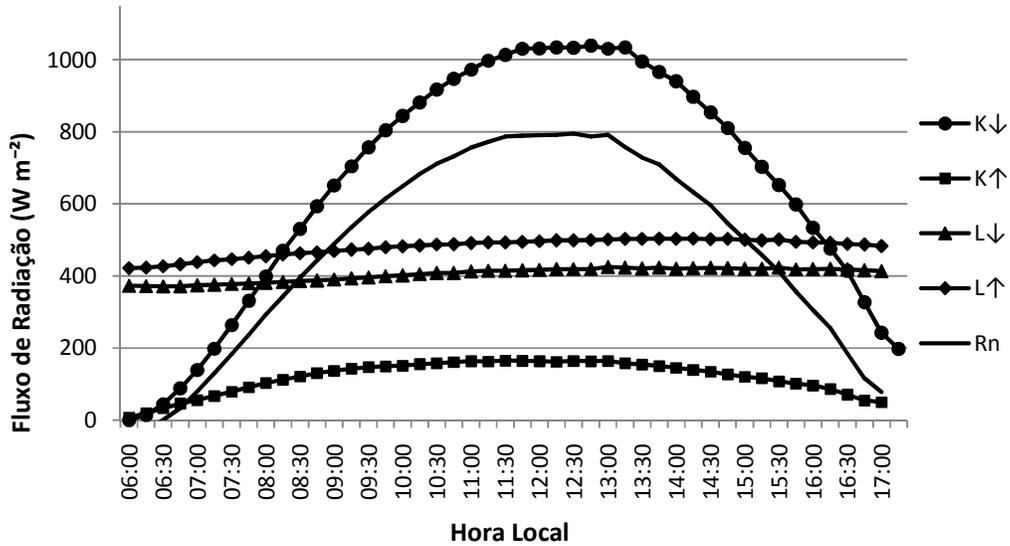


Figura 6. Medidas dos componentes do balanço de radiação durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010.

Para o final do ciclo da cana-de-açúcar (Figura 7) observou-se a condição de céu claro, sem variação de K_{\downarrow} ao longo dos horários estudados que indicasse presença de nebulosidade. O maior registro de K_{\downarrow} ocorreu às 11h45min, apresentando valor máximo de 1027 W m^{-2} . Para K_{\uparrow} o maior registro ocorreu às 11h15min, apresentando valor máximo de $200,8 \text{ W m}^{-2}$. A média de K_{\uparrow} e K_{\downarrow} para o período diurno foi, respectivamente de $137,39 \text{ W m}^{-2}$ e $655,56 \text{ W m}^{-2}$. Durante o período diurno, a L_{\downarrow} foi inferior a L_{\uparrow} , apresentando valor de 383 W m^{-2} e 499 W m^{-2} , respectivamente. O R_n acompanhou as variações de K_{\downarrow} e o máximo valor de R_n encontrado foi às 11h45min (705 W m^{-2}) com média diária de $413,58 \text{ W m}^{-2}$ durante os horários estudados.

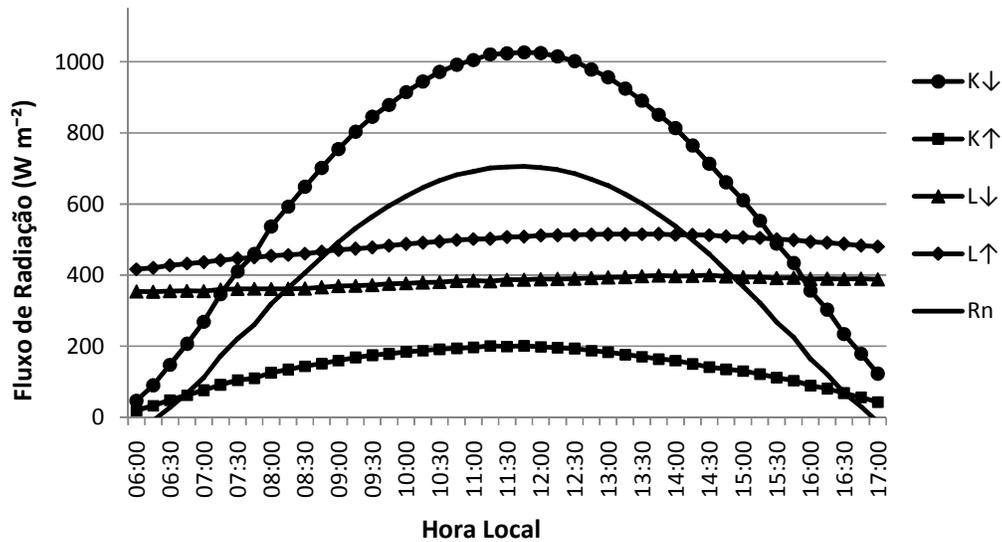


Figura 7. Medidas dos componentes do balanço de radiação durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010.

Foi possível observar também, que os valores mais elevados ao longo do dia de $L\uparrow$ são obtidos no início do ciclo da cultura, como apresenta as Figuras 4 e 5, que é quando a cultura está se desenvolvendo e não tem porte suficiente para sombrear a superfície do solo, com isso, a radiação será mais absorvida pela superfície e menos refletida, contudo a radiação que foi absorvida será posteriormente reemitida em direção a atmosfera terrestre.

As médias diárias de $L\uparrow$ durante os horários estudados para as Fases I, II, III e IV foram respectivamente iguais a 553 W m^{-2} ; 549 W m^{-2} ; $479,7 \text{ W m}^{-2}$; 484 W m^{-2} . O aumento na média de $L\uparrow$ na fase IV se deveu ao fato de que nesse momento a cultura começa a ter uma queda na produção da biomassa, amarelecimento e secagem, das folhas, redução na produção de folhas devido ao corte no fornecimento de água e consequentemente aumento do grau de exposição do solo e dos colmos da cana-de-açúcar.

O contrário ocorreu em $K\uparrow$, onde os maiores valores foram observados no final do ciclo da cultura (Figura 6 e 7), exatamente quando a cultura já se desenvolveu suficientemente para sombrear a superfície do solo. Desta forma a energia absorvida pelo sistema é inversamente proporcional a energia refletida pela superfície.

Já as médias diárias de $K\uparrow$ para os dias correspondentes as Fases I, II, III e IV foram respectivamente: $74,88 \text{ W m}^{-2}$; $85,98 \text{ W m}^{-2}$; $118,81 \text{ W m}^{-2}$; $137,39 \text{ W m}^{-2}$. Indicando que quanto mais massa verde maior a reflexão.

As Figuras 8 a 11 mostram o albedo medido no período diurno (6h às 17h) pelas torres micrometeorológicas na área produtiva de cana-de-açúcar para os dias (09.11.2009, 09.12.2009, 11.03.2010 e 03.10.2010), respectivamente.

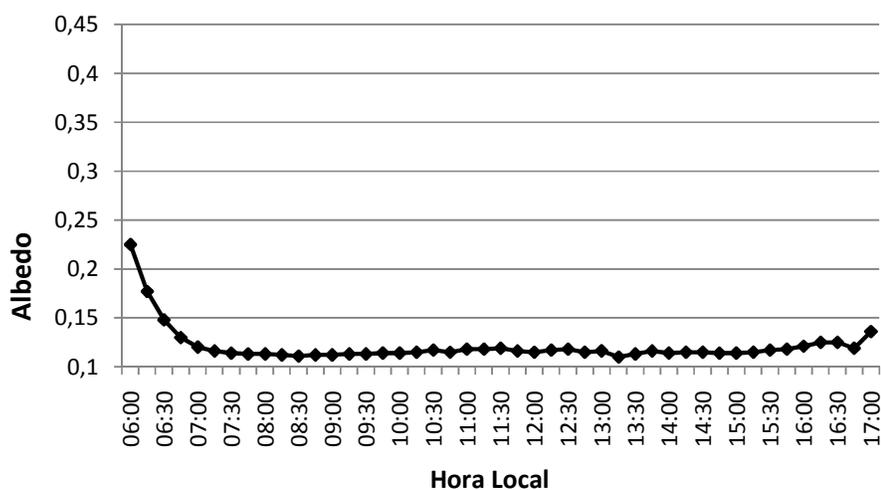


Figura 8. Comportamento do albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 09/11/2009.

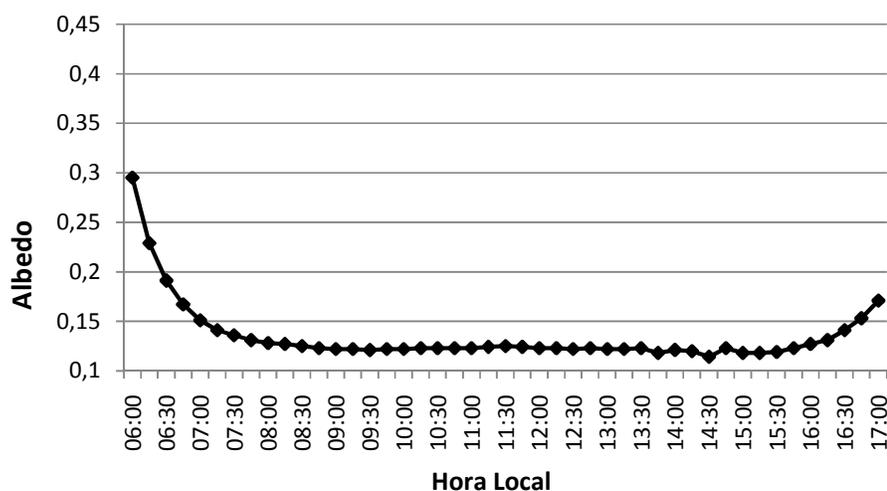


Figura 9. Comportamento do albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009.

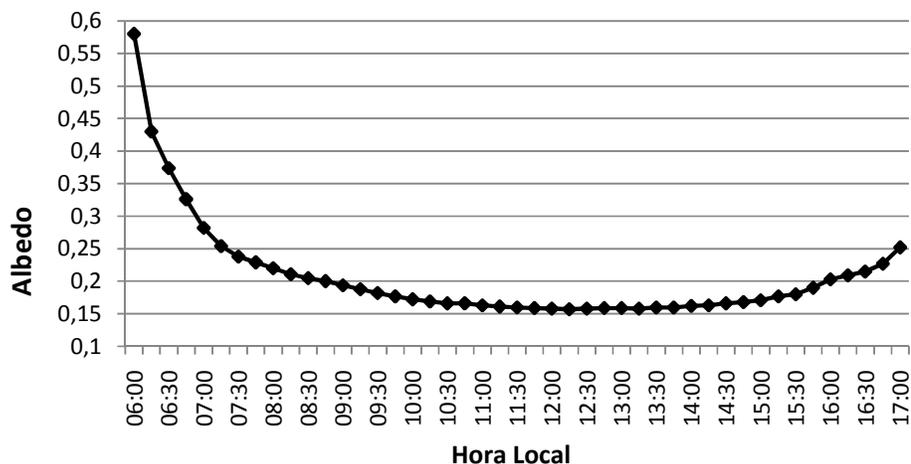


Figura 10. Comportamento do albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010.

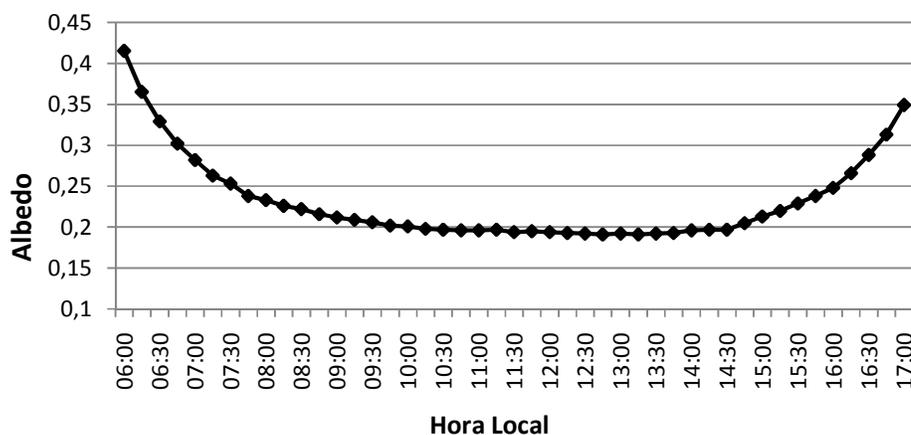


Figura 11. Comportamento do albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010.

Ao analisar o comportamento do albedo, observou-se para todas as datas estudadas que os maiores valores de albedo ocorreram nas primeiras horas da manhã e no final da tarde. André et al (2010) atribui essa tendência à dependência desta variável com o ângulo de elevação solar. Contudo, é importante saber que outras variáveis influenciam o comportamento do albedo, tais como: a umidade do solo e da planta, o grau de cobertura do solo, e tipo e quantidade de cobertura de nuvens.

O albedo médio diário para 09/11/2009 (brotação e emergência), foi de 0,12, nesse estágio de desenvolvimento verificou-se elevada absorção de energia em função

do grau de exposição do solo, ao fornecimento de água e ao pouco sombreamento. Essa característica persiste até a fase seguinte 09/12/2009 (perfilhamento e estabelecimento da cultura), com albedo médio diário de 0,13. Para o dia 11/03/2010 que está inserido na fase que corresponde ao crescimento e desenvolvimento dos colmos o albedo médio foi de 0,21, nesse momento há influência do sombreamento do solo devido ao desenvolvimento da cultura, com isso, a reflectividade da superfície para ondas curtas aumenta mais significativamente em relação às fases anteriores. O albedo médio para o período de maturação da cana representado pelo dia 03/10/2010 foi de 0,23.

Silva et al (2011) analisando albedo ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada em Juazeiro, observou que os menores valores ($0,19 \pm 0,02$) foram constatados no início do ciclo e que os valores do albedo oscilaram entre 0,15 e 0,27, com valor médio de $0,23 \pm 0,03$ para o ciclo da cultura. Juárez (2004) obteve um valor médio de 0,21 para cana-de-açúcar, com variações entre 0,15 e 0,25. Cabral et al. (2003) encontraram valores variando entre 0,12 e 0,32 para a cana-de-açúcar não irrigada, a depender da fase de crescimento da cultura.

André (1996), trabalhando com a cultura do milho, encontrou valores médios de albedo de 0,15 no estágio de desenvolvimento vegetativo, 0,17 no estágio de florescimento e 0,23 na maturação fisiológica, com valor médio para o ciclo da cultura de $0,16 \pm 0,04$, enquanto Cunha et al. (1989) observaram que o albedo médio diário para a cultura do milho esteve diretamente relacionado com o IAF, variando de 0,19 a 0,24. Para a cultura da soja, foram observados valores de albedo médio diário de 0,26 (Fontana et al.,1991).

De um modo geral as medidas de fluxos de superfície obtidas pela torre demonstraram que nos dias (09/11/2009 e 09/12/2009) houve uma interferência de nuvens, enquanto que os dias (11/03/2010) e (03/10/2010) não apresentaram nebulosidade (sendo estes considerados dias de céu-claro). Verificou-se também uma relação de caráter inverso entre R_n e albedo, onde as áreas com maiores valores de R_n estiveram associadas a menores valores de albedo, e vice-versa. Esse aspecto deixa evidente a atuação das propriedades da superfície na reflexão da radiação solar e sua relação com o total de energia disponibilizado aos processos de aquecimento do ar, aquecimento do solo e evaporação.

5.2 Comportamento dos componentes do balanço de radiação através de imagens MODIS e concordância entre os valores observados e modelados.

As Figuras 12 a 14 (09/11/2009), 15 a 17 (09/12/2009), 18 a 20 (11/03/2010) e 21 a 23 (03/10/2010) abrangem os estados da Bahia e Pernambuco, bem como a área do talhão correspondente ao estudo. Estas, ilustram, a distribuição espacial do albedo (α), IAF e balanço de radiação (R_n) para cada dia. Enquanto que as Tabela 4 a 7 mostram os valores de todos os componentes do saldo de radiação obtidos a partir de dados MODIS/TERRA com base no modelo SEBAL para o momento da passagem do satélite e os observados na torre micrometeorológica instalada na área experimental para 09/11/2009, 09/12/2009, 11/03/2010 e 03/10/2010, correspondentes, respectivamente, as fases I, II, III e IV da cana-de-açúcar.

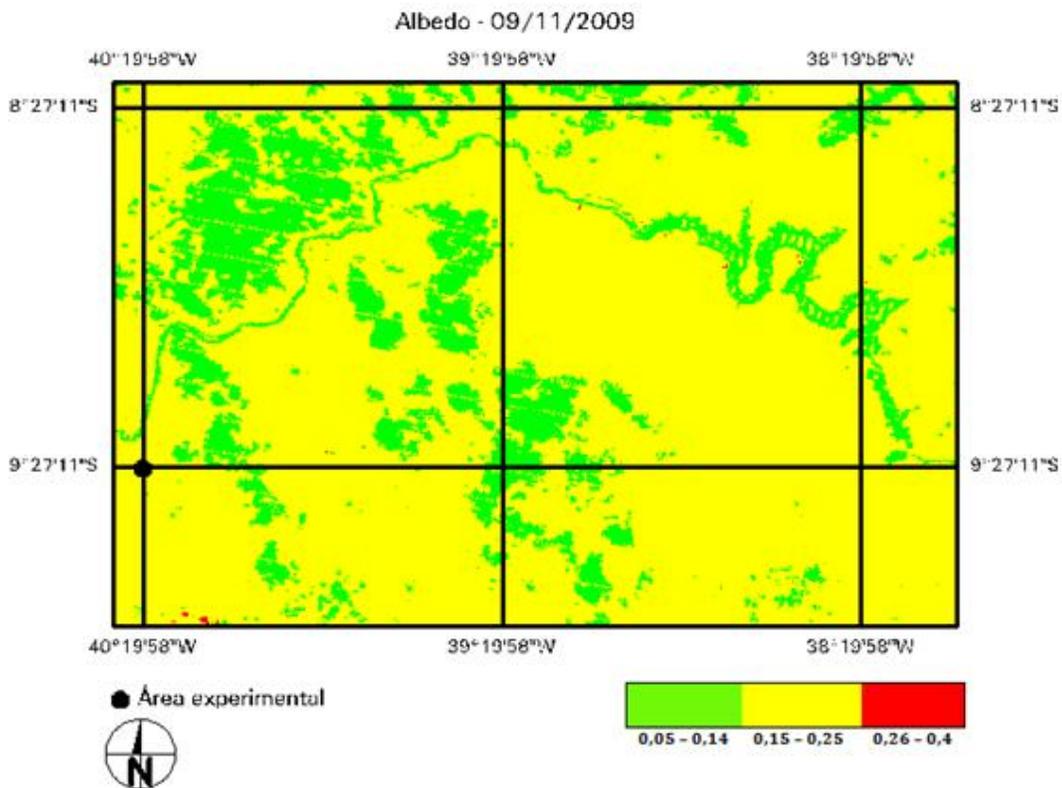


Figura 12: Mapa temático da distribuição do albedo (α) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/11/2009.

Para 18 dias após o plantio (Figura 12) os valores mínimos e máximos de albedo obtidos a partir de dados MODIS/TERRA foram 0,05 e 0,4, respectivamente, e o valor médio da imagem gerada correspondeu a 0,15. É possível observar que os menores valores de albedo corresponderam as áreas em verde, com destaque para o leito do rio São Francisco, cujos valores variaram entre 0,05 e 0,14. Silva et al. (2005) em um estudo abrangendo parte do estado de Pernambuco e Bahia utilizando dados TM/Landsat 5 encontraram albedo variando de 0,08 a 0,09 no Lago de Sobradinho e leito do rio São Francisco. Oliveira e Moraes (2013) encontraram valores de albedo em corpo hídrico na Amazônia menor ou igual a 0,10. Para a área de interesse foi encontrado albedo de 0,17.

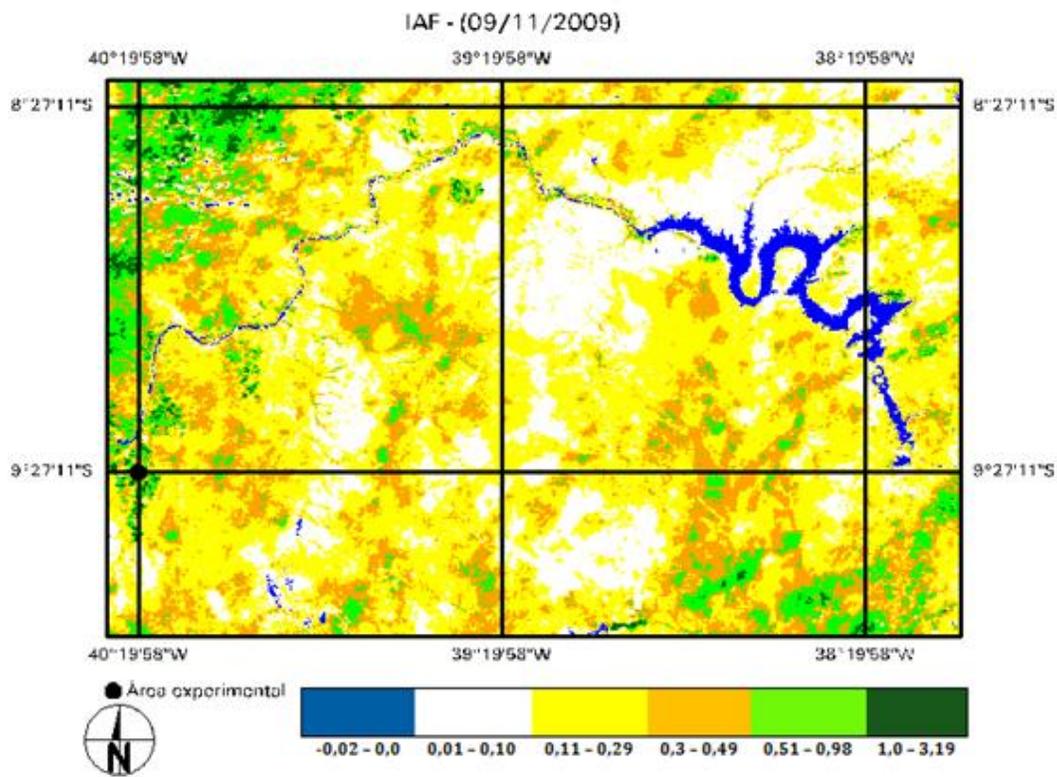


Figura 13: Mapa temático da distribuição do IAF obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/11/2009.

O IAF é um dos principais parâmetros biofísicos que caracterizam a interface planta-atmosfera, sendo definido como a área das folhas em relação à área de solo

abaixo do dossel (DORAISWAMY et al., 2004). Na cena (Figura 13) o IAF esteve entre -0,02 e 3,19. Os valores negativos ou nulos foram encontrados ao longo do rio São Francisco, como esperado. Na área experimental o IAF foi de apenas 0,082, visto que passaram-se somente 18 dias após o plantio da cana-de-áçúcar.

Na Figura 14 os valores de Rn variaram de 458 a 1444 W m⁻², sendo o valor médio igual a 657,57 W m⁻². É possível observar na cena que os menores valores correspondem as áreas em verde e os maiores em azul, estando a área experimental com cana-de-açúcar irrigada inserida na faixa correspondente ao amarelo, com valor de saldo de radiação de 623 W m⁻² para o momento da passagem do satélite. Ao longo do rio São Francisco o Rn esteve predominantemente entre 702 e 899 W m⁻². Silva et al. (2005) encontrou valores de Rn para o Lago de Sobradinho superior a 751,3 W m⁻² e para área irrigada de 655,1 W m⁻², dentro da faixa dos valores encontrados nesse estudo.

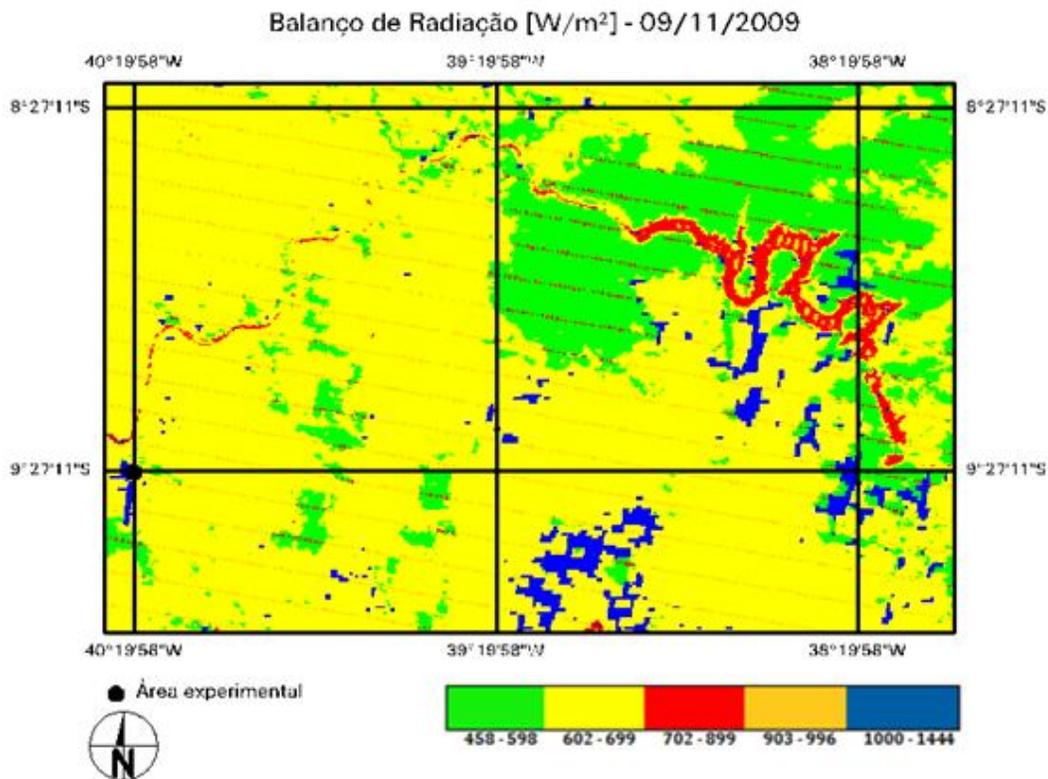


Figura 14: Mapa temático da distribuição do Balanço de Radiação (Rn) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/11/2009.

Tabela 4 - Medidas de concordância Viés (VS) ($W m^{-2}$) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) ($W m^{-2}$), balanço de radiação (Rn) ($W m^{-2}$) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) ($W m^{-2}$) para 09/11/2009

	α_s		$K\downarrow$		$L\downarrow$		$L\uparrow$		Rn		Rn24h	
	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O
		0,17	0,11	923	929	374	399	493	563	623	659	164
VS	0,06		-6		-25		-70		-36		6	
ER	54,5		0,6		6,3		12,4		5,5		3,8	

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4 é possível observar que os maiores erros relativos (ERs) foram nas estimativas do albedo e $L\uparrow$, e os menores nas estimativas de $K\downarrow$ e Rn24h.

O albedo estimado através da equação empírica de Tasumi (0,17) foi maior que o albedo observado (0,11), apresentando um viés de 0,06 e ER de 54,5%. Oliveira et al.(2015) encontraram para estimativa de albedo em área de cana-de-açúcar aplicando o modelo de Tasumi em imagens do sensor MODIS um erro relativo de 42% na estação seca.

Para $L\uparrow$ verificou-se uma razoável concordância, com ER de 12,4%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL ($493 W m^{-2}$) ter sido $70 W m^{-2}$ inferior à medida pela torre micrometeorológica ($563 W m^{-2}$).

O valor de $L\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA apresentou erro relativo de 6,3 %, com valor modelado de $374 W m^{-2}$ e observado de ($399 W m^{-2}$), o que caracteriza uma boa concordância.

Para o Rn verificou-se ER de 5,5%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL ($623 W m^{-2}$) ter sido $36 W m^{-2}$ inferior à medida pela torre micrometeorológica ($659 W m^{-2}$). Lira (2008) obteve ERs de 9,2% e 18,4% em estimativas de Rn pelo modelo SEBAL em áreas de cana-de-açúcar.

A estimativa de Rn 24h para a área experimental apresentou ER de apenas 3,8%, superestimando o valor medido pela torre em apenas $6 W m^{-2}$. Essa medida de erro é melhor que as obtidas por Ruhof *et al.* (2012), que encontraram para estimativas de Rn24h utilizando dados MODIS (TERRA e AQUA) ERs de 15% e 23%.

O valor de $K\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA ($923 W m^{-2}$) apresentou valor muito próximo ao observado na torre micrometeorológica da área

experimental (929 W m^{-2}), com ER de 0,6%, o que caracteriza uma excelente concordância. Oliveira e Moraes, 2013 encontraram ER de 0,2% na estimativa de $K \downarrow$ a partir de dados MODIS/TERRA na Amazônia enquanto que Silva et al. (2005) trabalhando com dados medidos na estação micrometeorológica de Bebedouro (PE) e com o satélite TM/Landsat 5 obtiveram ER de 3,2% na estimativa de $K \downarrow$. Esses resultados evidenciaram que a equação de estimativa de $K \downarrow$ utilizada no modelo SEBAL apresenta boa acurácia.

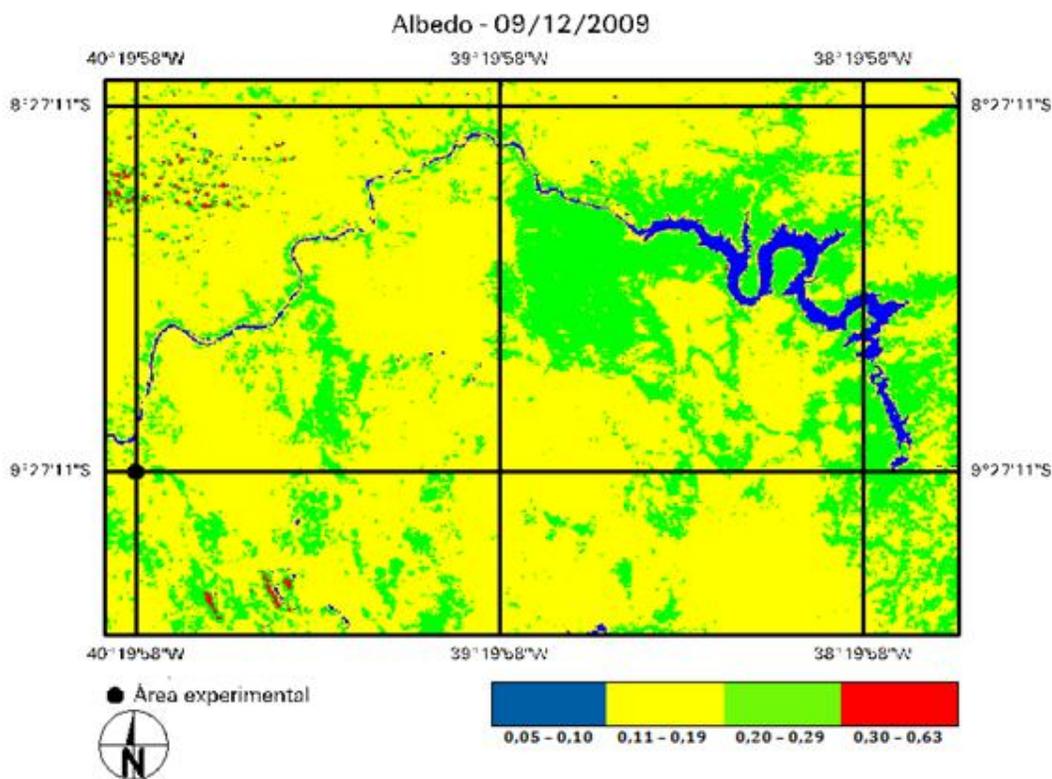


Figura 15: Mapa temático da distribuição do albedo (α) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009.

Os menores valores de albedo para 48 dias após o plantio (Figura 15) foram encontrados na água variando de 0,05 a 0,10, o que justifica dizer que a energia absorvida pelo sistema é inversamente proporcional a energia refletida pela superfície. Sendo a água um excelente absorvedor de energia. As áreas em vermelho representam os maiores valores de albedo, justamente nas áreas onde verificou-se a presença de

nuvens. Silva et al. 2011 em estudo com imagens orbitais no perímetro irrigado de São Gonçalo na Paraíba verificaram valores elevados de albedo em áreas com presença marcante de nuvens. Oliveira et al. (2015) mencionam que a presença de nebulosidade na cena aumenta a quantidade de radiação refletida que é captada pelo sensor, gerando dados com valores superestimados de reflectância da superfície devido interferência na resposta de reflectância em virtude das condições atmosféricas. Na área com cana-de-açúcar o albedo foi de 0,18.

Na cena (Figura 16) o IAF esteve entre -0,02 e 3,19. Os valores negativos ou nulos foram encontrados ao longo do espelho d'água do rio São Francisco, como esperado. As outras áreas em azul apresentaram valores muito baixos, porém não nulos nem negativos; essas áreas são onde se verificou presença de nuvens, o que leva a crer que as mesmas atrapalharam a captação da reflectância pelo sensor. Na área experimental o IAF variou, de apenas 0,082 (18DAP) para 0,154 (48DAP), mostrando que houve um aumento na área que o dossel ocupa no solo, o que é de se esperar, pois nesse momento a cana começa a lançar perfilhos e se estabelecer.

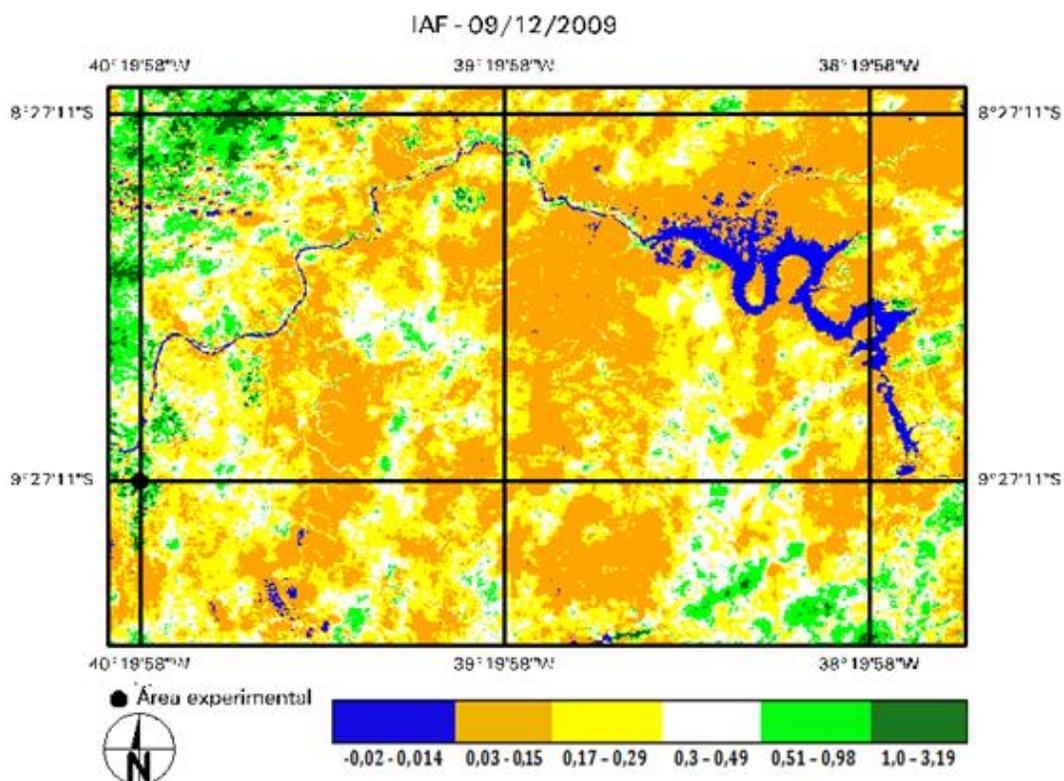


Figura 16: Mapa temático da distribuição do IAF obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009.

Na Figura 17, com auxílio da legenda é possível ver que os valores de Rn variaram de 228,5 a 1465 W m⁻², sendo o valor médio igual a 607,83 W m⁻². A maior parte da cena esta na faixa de valores do verde e amarelo, estando a área do estudo inserida na faixa do amarelo, mais precisamente com valor de Rn de 624,7 W m⁻². Ao longo do rio São Francisco o Rn esteve predominantemente entre 708,5 e 1465 W m⁻². Oliveira e Moraes (2013) observaram em sua pesquisa que os maiores valores de Rn estiveram associados a corpos de água, o que foi possível observar também nesse estudo.

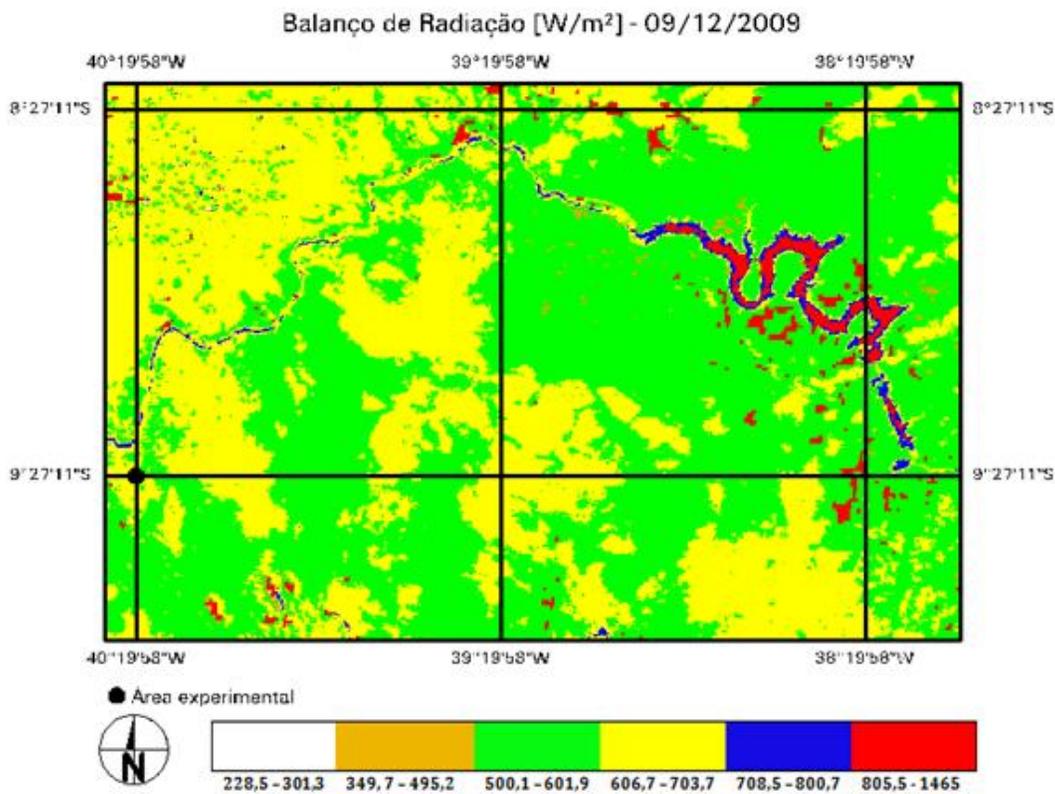


Figura 17: Mapa temático da distribuição do Balanço de Radiação (Rn) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009.

Tabela 5. Medidas de concordância Viés (VS) ($W m^{-2}$) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) ($W m^{-2}$), balanço de radiação (Rn) ($W m^{-2}$) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) ($W m^{-2}$) para 09/12/2009.

	α_s		$K\downarrow$		$L\downarrow$		$L\uparrow$		Rn		Rn24h	
	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O
	0,18	0,12	925	921	374	394	489	557	625	646	181	170
VS	0,06		4		-20		-68		-21		11	
ER	50		0,4		5,1		12,2		3,3		6,5	

É possível observar na Tabela 5 que os maiores erros relativos (ERs) continuaram sendo no albedo e no $L\uparrow$, enquanto que os menores foram nas estimativas de $K\downarrow$ e Rn.

O albedo estimado através da equação empírica de Tasumi (0,18) foi maior que o albedo observado (0,12), apresentando um viés de 0,06 e ER de 50%.

Para $L\uparrow$ verificou-se uma razoável concordância, com ER de 12,2%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL ($489 W m^{-2}$) ter sido $68 W m^{-2}$ inferior à medida pela torre micrometeorológica ($557 W m^{-2}$).

O valor de $L\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA apresentou erro relativo de 5,1 %, com valor modelado de $374 W m^{-2}$ e observado de ($394 W m^{-2}$), o que caracteriza uma boa concordância.

A estimativa de Rn 24h para a área experimental apresentou ER de apenas 6,5%, superestimando o valor medido pela torre em $11 W m^{-2}$.

Para o Rn verificou-se ER de 3,3%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL ($625 W m^{-2}$) ter sido $21 W m^{-2}$ inferior à medida pela torre micrometeorológica ($646 W m^{-2}$).

O valor de $K\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA ($925 W m^{-2}$) apresentou valor muito próximo ao observado na torre micrometeorológica da área experimental ($921 W m^{-2}$), com ER de 0,4%, o que caracteriza uma excelente concordância.

Para 140 dias após o plantio os valores mínimos e máximos de albedo obtidos a partir de dados MODIS/TERRA foram 0,04 e 0,55 e o valor médio da imagem gerada correspondeu a 0,14. É possível observar na Figura 18 que os menores valores de albedo corresponderam as áreas em azul, com destaque para o espelho d'água do rio

São Francisco e na projeção das sombras das nuvens no solo, cujos valores variaram entre 0,04 e 0,1 e os maiores valores na área da nuvem. Para a área de interesse foi encontrado albedo de 0,15. Braga e Araújo (2011) observaram diminuição do albedo nas áreas sombreadas por nuvens, encontrando valores inferiores a 5%. Podendo dizer que nas áreas com presenças de sombras das nuvens, há efetiva diminuição na intensidade da radiação solar global; portanto, a radiação solar refletida por tais áreas será menor do que ocorreria na ausência das nuvens. Percebe-se que nos pixels sombreados há subestimativa do albedo.

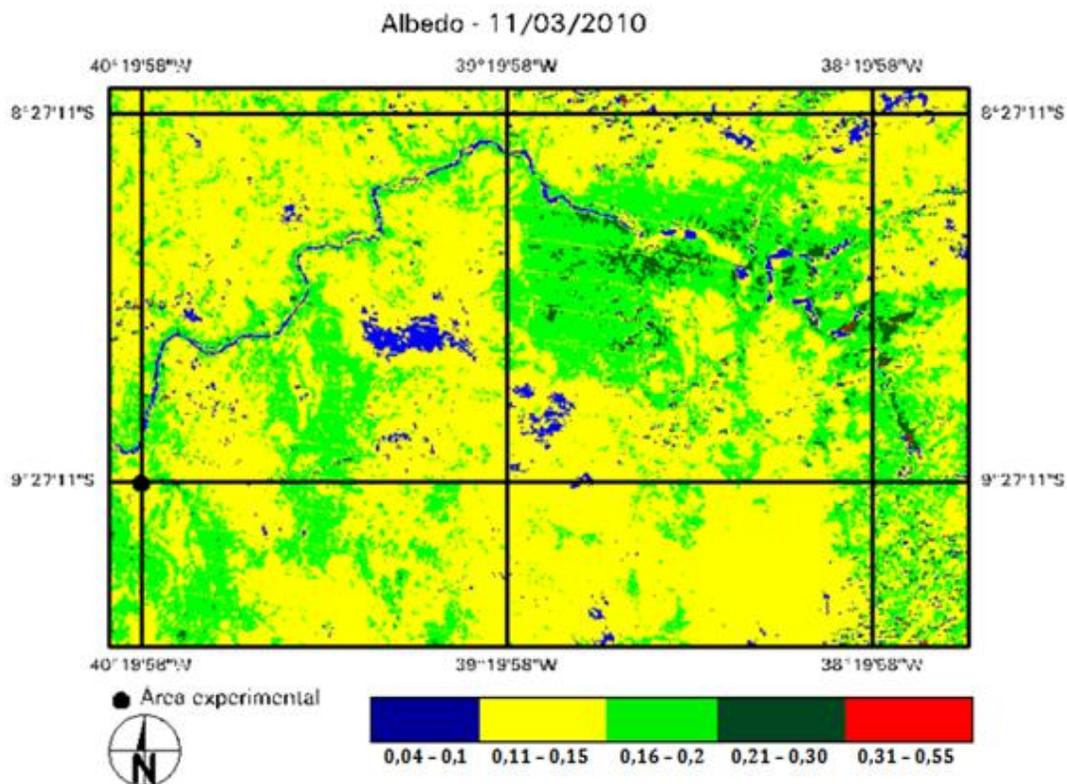


Figura 18: Mapa temático da distribuição do albedo (α) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010.

Na Figura 19 o IAF esteve entre -0,05 e 2,79. Os valores negativos ou nulos foram encontrados ao longo do espelho d'água do rio São Francisco, como esperado. As outras áreas em azul apresentaram valores muito baixos, porém não nulos nem negativos. Na área experimental o IAF foi de 1,69, mostrando que houve um aumento

da cobertura do solo pelo dossel, o que é de se esperar, pois nesse momento ocorre o crescimento e desenvolvimento dos colmos.

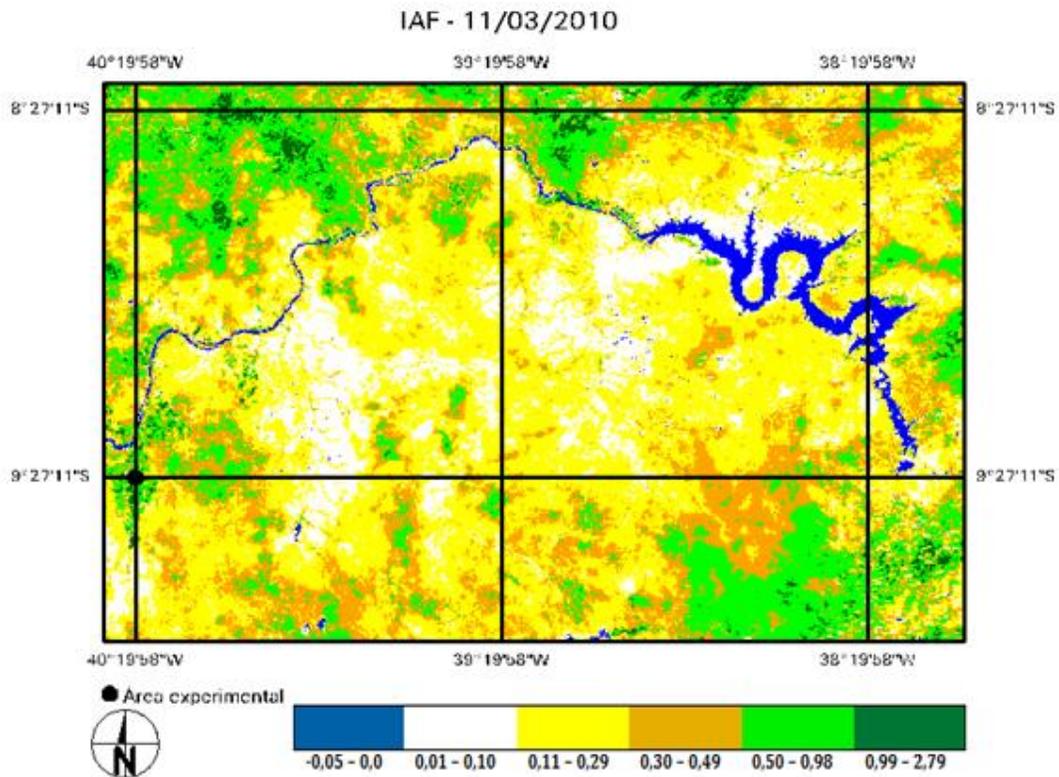


Figura 19: Mapa temático da distribuição do IAF obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010.

Na Figura 20 é possível ver que os valores de R_n variaram de 324 a 1467 $W m^{-2}$, sendo o valor médio igual a 644 $W m^{-2}$. Pode-se observar na cena que os menores valores corresponderam as áreas em laranja e os maiores nas em vermelho. A maior parte da cena esta na faixa de valores do amarelo, estando a área de estudo nessa mesma faixa, mais precisamente com valor de R_n de 659,2 $W m^{-2}$. Ao longo do rio São Francisco o R_n esteve predominantemente entre 699 e 932 $W m^{-2}$.

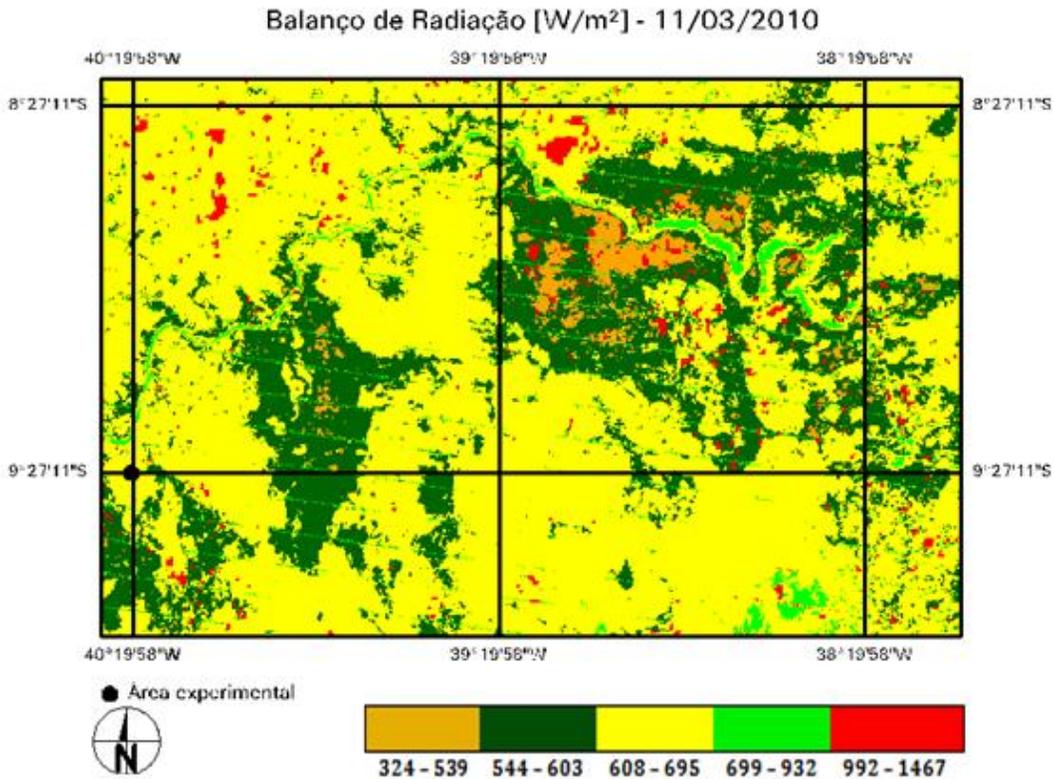


Figura 20: Mapa temático da distribuição do Balanco de Radiação (Rn) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010.

Tabela 6. Medidas de concordância Viés (VS) ($W m^{-2}$) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) ($W m^{-2}$), balanço de radiação (Rn) ($W m^{-2}$) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) ($W m^{-2}$) para 11/03/2010.

	α_s		$K\downarrow$		$L\downarrow$		$L\uparrow$		Rn		Rn24h	
	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O
		0,15	0,17	934	932	385	407	486	486	682	697	186
VS	-0,02		2		-22		0		-15		-14	
ER	11,7		0,2		5,4		0		2,2		7	

Para o dia correspondente a fase em que ocorre o crescimento e desenvolvimento dos colmos foi possível observar através da Tabela 6 que os maiores erros foram no albedo e no Rn24h, enquanto que os menores erros foram na estimativa de $L\uparrow$ e $K\downarrow$.

O albedo estimado (0,15) foi menor que o albedo observado (0,17), apresentando um viés de 0,02e ER de 11,7%. Ruhoff (2011) encontrou valores estimados de albedo variando entre 0,15 e 0,19 em uma plantação de cana-de-açúcar em sertãozinho-SP.

Na estimativa de R_n 24h para a área experimental observou-se um ER de 7%, devido ao valor estimado pelo modelo SEBAL ter sido 14 W m^{-2} inferior ao observado.

O valor de $L\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA apresentou erro relativo de 5,4 %, com valor modelado de 385 W m^{-2} e observado de (407 W m^{-2}), o que caracteriza uma boa concordância.

Para o R_n verificou-se ER de 2,2%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL (682 W m^{-2}) ter sido 15 W m^{-2} inferior à medida pela torre micrometeorológica (697 W m^{-2}).

O valor de $K\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA (934 W m^{-2}) apresentou valor muito próximo ao observado na torre micrometeorológica da área experimental (932 W m^{-2}), com ER de 0,2%, o que caracteriza uma excelente concordância.

Para $L\uparrow$ verificou-se uma excelente concordância, com ER de 0%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL (486 W m^{-2}) ter sido exatamente igual ao valor medido pela torre micrometeorológica (486 W m^{-2}).

Os menores valores de albedo para 346 dias após o plantio (Figura 21) foram encontrados na água variando de 0,04 a 0,10. As áreas em vermelho representam os maiores valores de albedo. Na área com cana-de-açúcar o albedo foi de 0,14.

No que se refere ao índice de área foliar para 346 DAP (Figura 22) é possível observar que os menores valores continuam sendo no curso do rio São Francisco, com valores entre -0,03 e 0,0. As áreas em branco predominam na cena com IAF entre 0,01 e 0,10. Na área de interesse o IAF deu uma reduzida em relação aos valores encontrados na II e III fase da cana-de-açúcar, apresentando valor igual a 0,56. Essa tendência observada é justificada pelo fato de que no final do ciclo da cana-de-açúcar começa a ocorrer uma queda na produção da biomassa, amarelecimento e secagem das folhas, redução na produção de folhas, ou seja, uma redução na área que o dossel ocupa no solo.

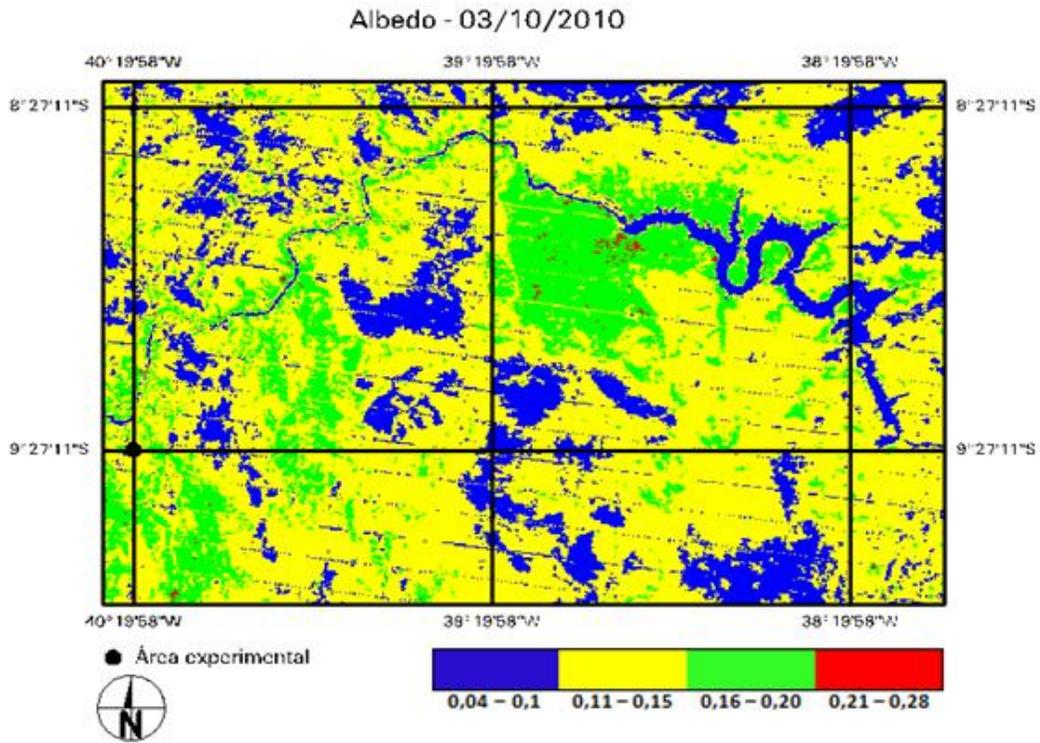


Figura 21: Mapa temático da distribuição do albedo (α) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010.

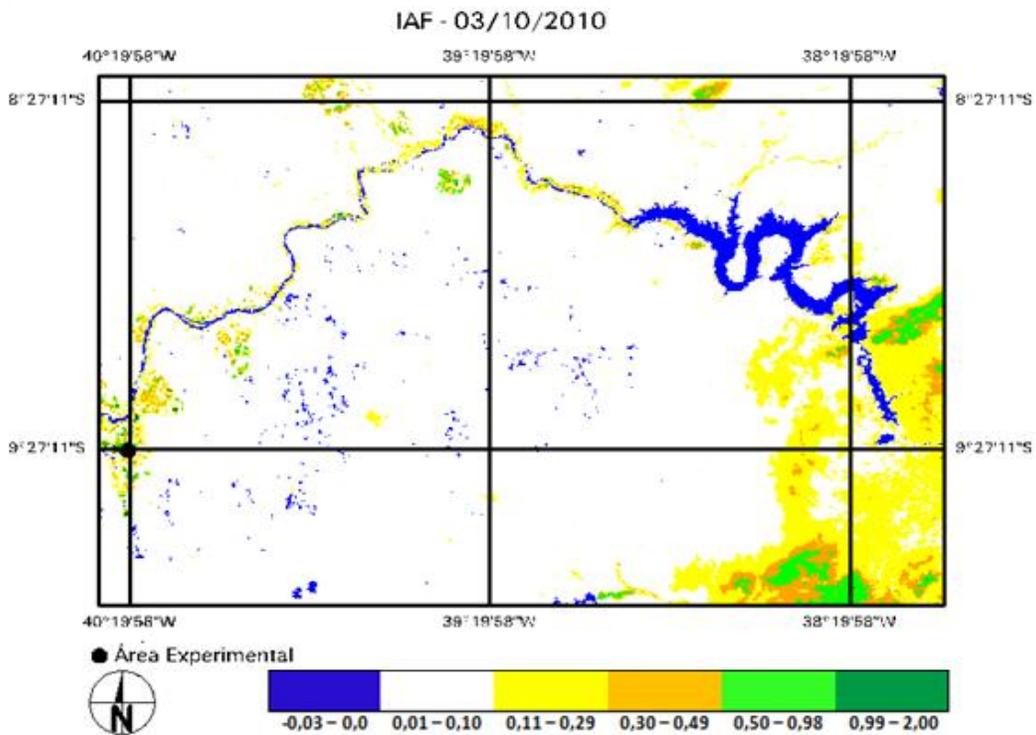


Figura 22: Mapa temático da distribuição do IAF obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010.

Os valores de Rn (Figura 23) variaram de 394 a 647 W m⁻². Pode-se observar na cena que os menores valores corresponderam as áreas em laranja e os maiores em pequenos pontos em vermelho. A maior parte da cena esta na faixa de valores do amarelo, estando a área de estudo nessa mesma faixa, mais precisamente com valor de Rn de 475 W m⁻². Ao longo do rio São Francisco o Rn esteve predominantemente entre 502 e 551 W m⁻².

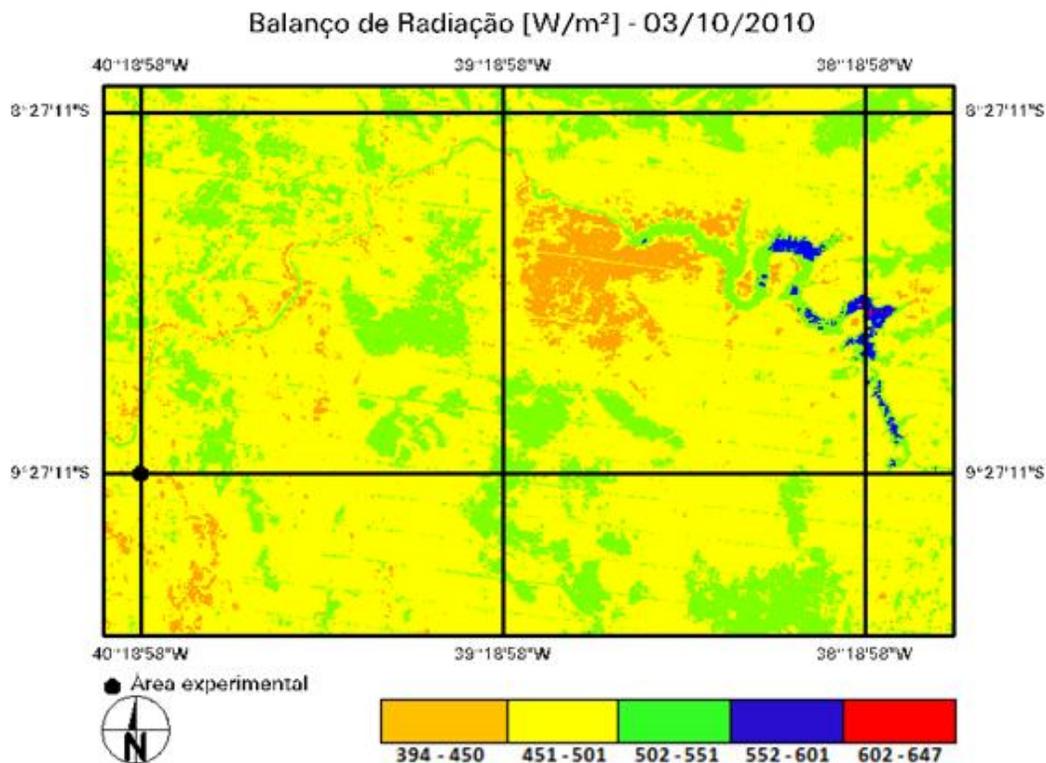


Figura 23: Mapa temático da distribuição do Balço de Radiação (Rn) obtido a partir de dados MODIS/TERRA na região que abrange área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010.

Observou-se em algumas cenas a presença de linhas tracejadas. Essas linhas foram encontradas apenas na banda 5 do produto MOD09GA. Oliveira e Moraes (2013) também constataram essa ocorrência e os mesmos mencionam que essas linhas são decorrentes de um ruído do tipo *striping* (elipses tracejadas) e que esse tipo de ruído é comum em imagens de sensoriamento remoto e ocorre devido a falhas de detectores.

Tabela 7 - Medidas de concordância Viés (VS) ($W m^{-2}$) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) ($W m^{-2}$), balanço de radiação (Rn) ($W m^{-2}$) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) ($W m^{-2}$) para 03/10/2010.

	α_s		$K\downarrow$		$L\downarrow$		$L\uparrow$		Rn		Rn24h	
	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O
		0,14	0,19	982	991	381	383	540	499	672	682	181
VS	-0,05		-9		-2		41		-10		25	
ER	26,3		0,9		0,5		8,2		1,5		16	

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7 é possível observar que os maiores erros relativos (ERs) foram nas estimativas do albedo e Rn24h e os menores nas estimativas de $L\downarrow$ e $K\downarrow$.

O albedo estimado através da equação empírica de Tasumi (0,14) foi menor que o albedo observado (0,19), apresentando um viés de 0,05 e ER de 26,3%. Período em que ocorrem amarelecimento e seca das folhas em proporção maior que o crescimento, caracterizado pelo intenso armazenamento de açúcares, devido ao corte na irrigação. Gomes (2009) obteve valores de albedo entre 0,16 e 0,20 para cana-de-açúcar empregando os parâmetros apresentados por Allen et al (2007) e Tasumi et al (2008).

A estimativa de Rn24h para a área experimental apresentou ER de 16%, superestimando o valor medido pela torre em $25 W m^{-2}$, o que caracteriza uma razoável concordância.

Para $L\uparrow$ verificou-se uma boa concordância, com ER de 8,2%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL ($540 W m^{-2}$) ter sido $41 W m^{-2}$ superior à medida pela torre micrometeorológica ($499 W m^{-2}$).

Para o Rn verificou-se ER de 1,5%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL ($672 W m^{-2}$) ter sido $10 W m^{-2}$ inferior à medida pela torre micrometeorológica ($682 W m^{-2}$).

O valor de $K\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA ($982 W m^{-2}$) apresentou valor muito próximo ao observado na torre micrometeorológica da área experimental ($991 W m^{-2}$), com ER de 0,9%, o que caracteriza uma excelente concordância.

Assim como $K \downarrow$ o valor de $L \downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA apresentou valor muito próximo ao observado, apresentando erro relativo de 0,5 %, com valor modelado de 381 W m^{-2} e observado de (383 W m^{-2}), o que caracteriza, também, uma excelente concordância.

Vale salientar que quando tratamos com imagens geradas a partir do sensoriamento remoto, a radiação detectada pelo sensor é causada pela mistura da resposta de diferentes alvos e os efeitos atmosféricos, que podem causar alterações importantes nos dados. Os fatores relacionados a cada sistema sensor (diferença na resolução espacial, variações nas respostas radiométricas), e ao meio ambiente (absorção e espalhamento atmosféricos, quantidade de moléculas dispersas na atmosfera, presença de nuvens e suas sombras, variação na irradiância e ângulo solar, variações na fenologia vegetal e nos componentes do solo segundo as mudanças estacionais) podem também interferir nos resultados das detecções (SINGH, 1989).

Liang et al (2002) cita a incompatibilidade entre a medida pontual e a resolução do sensor MODIS como um dos problemas da validação do albedo por meio de produtos desse sensor. O produto MOD09GA, por exemplo, utilizado nesse estudo pode incorporar a resposta espectral de diferentes alvos na superfície, contaminando a reflectância do alvo de interesse.

5.3 Evapotranspiração da cultura

Podemos observar na Tabela 8 que a cultura apresentou o seu menor consumo hídrico na Fase I, quando as plantas iniciavam o seu desenvolvimento vegetativo e ainda possuíam um baixo índice de área foliar. Os maiores valores da evapotranspiração da cultura ocorreram na Fase II, provavelmente a fase fenológica na qual o metabolismo interno da cultura exigiu um maior uso da água. Quando se compara as diferentes metodologias usadas para determinação da ET_c percebe-se uma diferença maior na primeira fase, com um valor mais baixo para a metodologia da Razão de Bowen $3,34 \text{ mm.d}^{-1}$ e um maior valor para a metodologia que usou o saldo de radiação medido à superfície $5,44 \text{ mm.d}^{-1}$. Nas Fases II e IV observa-se o contrário do que aconteceu na Fase I, a metodologia ET_{cBERB} foi quem apresentou maiores valores $6,45$ e $6,15 \text{ mm.d}^{-1}$, respectivamente. Verifica-se, ainda, que ET_{cPM2} que usou o R_n estimado pelo satélite, apresentou os menores valores da ET_c , em quase todas as fases fenológicas,

exceto na fase I. Quando se analisa os valores médios, a maior ETc foi estimada pelo método ETcPM1 5,81 mm.d⁻¹ que usou o Rn medido à superfície, enquanto que o menor valor médio, 5,17 mm.d⁻¹ foi determinado quando se usou o Rn estimado pelo satélite. Isto deixa claro, que o balanço de radiação realizado pelo sensoriamento remoto não acarretará em prejuízos na estimativa das necessidades hídricas da cana de açúcar na região em estudo.

Tabela 8 - Valores da Evapotranspiração da cultura da cana de açúcar (mm.d⁻¹) determinada por diferentes metodologias: ETcBERB (Balanço de Energia pela Razão de Bowen); ETcPM1 (Penman-Monteith-FAO) usando o saldo de radiação (Rn) medido à superfície, ETcPM2 (Penman-Monteith-FAO) usando o saldo de radiação (Rn) determinado pelo satélite.

Fases Fenológicas	ETcBERB (mm.d ⁻¹)	ETcPM1 (mm.d ⁻¹)	ETcPM2 (mm.d ⁻¹)
I (09/11/2009)	3,14	5,44	4,69
II (09/12/2009)	6,45	6,22	5,59
III(11/03/2010)	5,49	5,83	4,92
IV(03/10/2010)	6,15	5,77	5,47

De acordo com a Tabela 9 é possível verificar que não houve diferença significativa entre os valores médios da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar obtidos pelas diferentes metodologias estudadas quando aplicado o teste t de Student ao nível de 5% de significância ($\alpha = 0,05$). Ao determinar o coeficiente de correlação de Pearson entre (ETcBERB e ETCPM1) observou-se $r = 0,86$ e entre (ETcBERB e ETCPM2) um $r = 0,89$. Ambos os resultados indicam correlação positiva forte, pois apresentaram coeficientes com valores positivos e próximos de 1.

Tabela 9 - Resultados das análises dos valores da Evapotranspiração da cultura da cana de açúcar (mm.d⁻¹) durante o seu ciclo com o teste t de Student pareado ao nível de 5% de significância ($\alpha = 0,05$) determinada por diferentes metodologias: ETcBERB (Balanço de Energia pela Razão de Bowen); ETcPM1 (Penman-Monteith-FAO) usando o saldo de radiação (Rn) medido à superfície, ETcPM2 (Penman-Monteith-FAO) usando o saldo de radiação (Rn) determinado pelo satélite.

Média e desvio padrão	ETcBERB (mm.d ⁻¹)	ETcPM1 (mm.d ⁻¹)	ETcPM2 (mm.d ⁻¹)	p-valor (ETcBERB e ETCPM1)	p-valor (ETcBERB e ETCPM2)
	5,31 ± 1,50	5,82 ± 0,32	5,17 ± 0,43	0,47 ^{ns}	0,82 ^{ns}

6. CONCLUSÃO

Não houve nenhuma condição atípica no comportamento dos termos do balanço de radiação obtidos à superfície, quando se consideraram os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, embora os valores absolutos dos termos tenham sido diferentes.

Os termos do Balanço de Radiação encontrados através de imagens MODIS aplicando o modelo SEBAL apresentaram comportamento esperado para os alvos, com valores consistentes e próximos aos encontrados à superfície, exceto para o albedo que apresentou erros de 54,5%, 50%, 11,7% e 26% para as fases de I a IV, respectivamente.

Por fim, a evapotranspiração usando o R_n proveniente do processamento de imagens de satélite não apresentou diferença significativa em relação a ET_{cBERB} e a ET_{cPM1} . Conclui-se, portanto, que o sensoriamento remoto pode perfeitamente ser usado na determinação das necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar na região em estudo.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, v.98, p.899-920, 2011.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; KJAERGAARD, J. H. (2010) **METRIC - Mapping Evapotranspiration at High Resolution**, Application Manual. Idaho: Idaho University, 2010. 175p.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration "METRIC" - model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 133 (4): 380-394.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH. Evapotranspiration del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 1.ed. Roma: FAO, 2006a, 298p. (FAO, Estudio Riego e Drenaje Paper, 56).
- ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; WRIGHT, J. L.; HOWELL, T. A.; VENTURA, F.; SNYDER, R.; ITEN FISU, D.; STEDUTO, P.; BERENGENA, J.; YRISARRY, J. B.; SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; PERRIER, A.; ALVES, I.; WALTER, I.; ELLIOTT, R. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET₀ by the FAO56 Penman- Monteith method. **Agric. Water Manage.** 81, 1-22, 2006b.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. 2002. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and user's manual - Idaho implementation**. Idaho University, Idaho, USA. 98 p.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 326 p. (FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, 56).
- ALVES, A. V.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação num cultivo de melão. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10, 1997, Piracicaba. **Anais...**, Piracicaba: SBA, 1997. p.520-522.
- ANDRÉ, R. G. B., VISWANADHAM, Y. Radiation Balance of soybeans grown in Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.30, n.3, p.157-173, 1983.
- ANDRÉ, R. G. B., SILVA FILHO, V.P., MOLION, L.C.B., NOBRE, C.A. Balanço de radiação sobre a floresta amazônica (estações seca e úmida). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.3, p.269-274, 1988.
- ANDRÉ, R. G. B. **Aspectos energéticos e hídricos da cultura do milho (*Zea mays*) na região de Jaboticabal, SP**. 1996. 96p. Tese (Livre-docência) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal-UNESP. Jaboticabal, SP, 1996.

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

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (Saccharum spp.): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 140p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP. 1993.

BASTIAANSSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Wageningen Agricultural University. Ph.D. Thesis, Wageningen, 273p, 1995.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; ALLEN, R. G. 2005. SEBAL for spatially distributed ET under actual management and growing conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 131 (1): 85-93.

BASTOS, E. Cana-De-Açúcar O Verde Mar de Energia. São Paulo: Ícone Editora, 1987. 93 – 105p.

BEZERRA, G. B.; BEZERRA, J. R. C.; SILVA, B. B.; SANTOS, C. A. C. Surface energy Exchange and evapotranspiration from cotton crop under full irrigation conditions in the Rio Grande do Norte State, Brazilian Semi-Arid. *Bragantia*, v.74, p.120-128, 2015.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. A.; SILVA, E. F. F.; LOPES, P. M. O.; SILVA, B. B. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para Mossoró (RN, BRASIL). **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 3, p. 211 – 220, jul. – set., 2014.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; BEZERRA, J. R. C.; SOFIATTI, V.; SANTOS, C. A. C. Evapotranspiration and crop coefficient for sprinkler-irrigation cotton crop in Apodi Plateau semiarid lands of Brazil. *Agricultural Water Management*, v.107, p.86-93, 2012.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, 171-11, 2008.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEN, A. 2002. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environment**, 79 (2-3): 329-343.

BONAN, P.; KUHN, S. L.; Mapeamento da produção da cana-de-açúcar no Brasil, com ênfase no Estado do Paraná e na sua Região Noroeste. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 1, p.122 – 147, 2012.

BORGES, V. P. **Necessidades hídricas e produtividade de água da cultura do meloeiro irrigado na região de Mossoró - RN**. 2011, 138f. Tese 83 (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais Campina Grande.

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

BRAGA, A. C.; ARAÚJO, A. L. Obtenção e comparação do albedo da superfície a partir de produtos terra – MODIS e TM - Landsat 5. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2011. Centro de Turismo de Guarapari – ES. *Anais: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*. Guarapari – ES, 2011.

BRUIN, H. A. R. (1987) From Penman to Makkink. In: Hooghart, J.C., Ed., *Proceedings and Information: TNO Committee on Hydrological Research N°39*. The Netherlands Organization for Applied Scientific Research TNO, Den Haag, 5-31.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; LIGO, M. A. V.; BRUNINI, O.; DIAS, M. A. F. S. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e CO₂ sobre plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) em Sertãozinho-SP. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.18, p.61-70, 2003.

CAMPOS, J. H. B. DA C.; SILVA, V. P. R.; ARAÚJO, L. E.; SILVA, M. T. Estimativa da produtividade do feijão caupi no município de Juazeiro – BA mediante cenários de mudanças climáticas utilizando o modelo DSSAT. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2011. Centro de Turismo de Guarapari - ES. *Anais: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*. Guarapari – ES, 2011.

CASTRO, P. R. C., KLUGE, R. A. *Ecofisiologia de culturas extrativistas: cana-de-açúcar, seringueira, coqueiro, dendazeiro e oliveira*. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. 138p.

CIB – Conselho de Informações sobre Biotecnologia. Guia da cana-de-açúcar: Avanço Científico Beneficia o País. Setembro 2009, p. 2-19. Disponível em: http://cib.org.br/wp-content/uploads/2011/10/guia_cana.pdf. Acesso em 28 de dezembro de 2015.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 2 - Safra 2015/16, n. 3 – Terceiro levantamento, Brasília - DF, p. 1-65, dezembro 2015a.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 2 – Safra 2015/16, n.1 – Primeiro levantamento, Brasília - DF, p. 1-28, abril 2015b.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar, v. 1 – Safra 2014/15, n.4 – Quarto Levantamento, Brasília - DF, p. 1-29, abril 2015c.

CUNHA, G. R., BERGAMACHI, H., BERLATO, M. A. Balanço de radiação em cultura de milho. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 6, 1989, Maceió. *Anais...*, Maceió: SBA, 1989. p. 322-329.

CRONQUIST, A. *An integrated system of classification of flowering plants*. New York: Columbia University Press., 1981. 126p

DELGADO, A. A.; AZEREDO CÉSAR, M. A. **Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana**. Vol. II. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1977.

DOMINGUES, A. T.; THOMAS JÚNIOR, A. A territorialização da cana-de-açúcar no Mato Grosso do Sul. Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, n.34, v.1, p.138-160, jan./jul.2012.

DORAISWAMY, P. C.; HATFIELD, J. L.; JACKSON, B.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.; STERN, A. Crop condition and yield simulations using landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, p. 548-559, 2004.

FERREIRA, R. C. **Evapotranspiração e produtividade de água no primeiro ciclo da cana-de-açúcar submetida à irrigação subsuperficial no semiárido do Brasil**. 2014. 138f. Tese (Doutorado). UFCG. Campina Grande – PB.

GOMES, H. B. **Balances de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais**. 2009.108p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.26, n.3, p.411-8, 1991.

FRITSCHEN, L. J. E FRITSCHEN, C. L. Bowen Ratio Energy Balance Method. In: VINEY, M. K. (ed.). **Micrometeorology in Agricultural Systems**. **Agronomy Monograph n° 47**. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2005. 584p.

HUETE, A. R. 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, 25 (3): 295-309.

IDE, B. Y.; BIANCHI, A. D. Influência do clima na produtividade da cana de açúcar In: Seminário de Tecnologia Agrônômica, 2., Piracicaba, 1984. Anais... São Paulo: COPERSUCAR, 1984. p. 196-204

IDE, B. Y.; OLIVEIRA, M. A. DE. Efeito do clima na produção da cana-de-açúcar. In: Seminário de Tecnologia Agrônômica, 3., Piracicaba, 1986. Anais... São Paulo: COPERSUCAR, 1986. p.573-583.

IMAGENS MODIS *Tiles* h14v09. Disponibilizada a partir <https://lpdaac.usgs.gov>, mantido pelo EOSDIS Terra NASA processos distribuídos do Active Centro Archive (LP DAAC) no Recursos USGS / Observação da Terra e Ciência (EROS) Center, Sioux Falls , Dakota do Sul. O produto de dados para a imagem foi fornecida pela NASA.

JUÁREZ, R. I. N. Variabilidade climática regional e controle da vegetação no sudeste: um estudo de observações sobre cerrado e cana de açúcar e modelagem numérica da atmosfera. São Paulo: USP, 2004. 193p. Tese Doutorado.

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

LEITE, M. R. **Sensoriamento remoto aplicado à análise temporal da relação uso da terra / temperatura e albedo de superfície na bacia do rio vieira no norte de minas gerais**. 2011. 111p. Dissertação (Mestrado). UFU. Uberlândia – MG.

LIANG, S. 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms. **Remote Sensing of Environment**, 76 (2): 213-238.

LIBERATO, A. M.; CARDOSO, F. L. Estudo do balanço de radiação em áreas de floresta e pastagens na Amazônia. **Acta Amazônica**, no prelo, 2006.

LIRA, V. M. **Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de-açúcar mediante imagens orbitais na região do submédio São Francisco**. 2008. 161 pp. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Yamada, T. (Ed.). *Ecofisiologia da Produção Agrícola*. Piracicaba: Potafós, 1987. p.113-118.

NAPP, A. C. T. **Análise da produção e mercado do setor sucroalcooleiro brasileiro sob a ótica do impacto econômico e ambiental**. 2008. 143p. Dissertação (Mestrado) UNISINOS. São Leopoldo – RS.

NASA. LP DAAC - *Land Processes Distributed Active Archive Center*. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis. Acesso em 12 de Dezembro de 2015.

OLIVEIRA, B. S.; MORAES, E. C.; RUDORFF, B. F. T.; MATAVELI, G. A. V. Análise do desempenho de modelos de albedo da superfície em áreas de cana-de-açúcar com dados MODIS/TERRA. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, Nº 67/3, p. 479-491, 2015.

OLIVEIRA, G. de.; MORAES, E. C. Validação do balanço de radiação obtido a partir de dados MODIS/TERRA na Amazônia com medidas de superfície do LBA. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 3, p. 353-364, 2013.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; ANTONINO, A. C. D.; MOURA, A. E. S. S. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p.1039–1046, 2014.

OMETTO, J. C. Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar. Piracicaba: ESALQ. 1980. 17p.

PAIVA, C. M.; FRANÇA, G. B.; LIU, W. T. H.; ROTUNNO FILHO, O. C. 2011. A comparison of experimental energy balance components data and SEBAL model results in Dourados, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (6): 1731-1745.

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

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; NOVA, N. A. V. **Evapotranspiração**. Fundag (Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola). Campinas-SP, 323 p.2013.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.97, p.141-150, 1999.

PINHEIRO, F. M. A.; PINHEIRO, J. R. H. S.; ALVALÁ, R. C.; GIELOW, R.; SOUZA, J.R.S.; MARQUES, J.; VISWANADHAM, Y. Balanço de radiação em trigo de primavera crescido na Austrália. *Boletim de Geografia Teorética*, v.24, nos. 47-48, p.83-97, 1994.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C.; Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2. Ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ROCHA, H. R.; MALHI, Y. S. 2012. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. *Remote Sensing*, 4 (3): 703-725.

SAMANI, Z. A.; HARGREAVES, G. H.; TRAN, V. D.; BAWAZIR A. S. Estimating solar radiation from temperature with spatial and temporal calibration. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, v. 137.n.11. 2011.

SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. B.; RAO, T. V. R.; SATYAMURTY, P.; MANZI, A. O. 2011. Downward long wave radiation estimates for clear-sky conditions over northeast Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26 (3): 443-450.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa de água consumida em perímetro irrigado do semiárido por sensoriamento remoto. *Pesq. Agropec.*, Brasília, v. 47, n.9 p. 1218-1226, set. 2012.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. *Revista Caatinga*, Mossoró, v.24, n. 3, p. 145-152, jul.-set., 2011.

SILVA, S. T. A.; **Mapeamento da evapotranspiração na bacia hidrográfica do baixo Jaguaribe usando técnicas de sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado). UFCG. Campina Grande – PB, 119p, 2009.

SILVA, T. G. da.; MOURA, M. S. B. de.; ZONIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L. S. B. de.; BRANDÃO, E. O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.2, p.139–147, 2011.

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

SUGUITANI, C.; MATSUOKA, S. Efeitos do fósforo nas características industriais e na produtividade agrícola em cana-de-açúcar (cana-planta) cultivada em duas regiões do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. Ciência do solo: fator de produtividade competitiva com sustentabilidade: resumos. Londrina: SBCS, 2001. p.119.

TASUMI, M.; ALLEN, R.; TREZZA, R. At surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. **Journal of Hydrologic Engineering**, n. February, p. 51–63, 2008.

TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L. US validation tests on the SEBAL model for evapotranspiration via satellite. ICID Workshop on Remote Sensing of Evapotranspiration for Large Regions, 17 sep. 2003.

VASCONCELOS, J. N. Derivados da cana-de-açúcar. STAB: açúcar, álcool e subprodutos, v. 20, n. 3, p. 16-18, 2002.

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