

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR OBTIDA POR
SENSORIAMENTO REMOTO NO MUNICÍPIO DE BOTUCATU - SP**

JANNAYLTON ÉVERTON OLIVEIRA SANTOS

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU - SP

Julho 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR OBTIDA POR
SENSORIAMENTO REMOTO NO MUNICÍPIO DE BOTUCATU - SP**

JANNAYLTON ÉVERTON OLIVEIRA SANTOS

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Célia Regina Lopes Zimback

Co-orientador: Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU – SP

Julho 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S237e Santos, Jannaylton Éverton Oliveira, 1990-
Evapotranspiração da cana-de-açúcar obtida por sensoriamento remoto no município de Botucatu - SP / Jannaylton Éverton Oliveira Santos. - Botucatu : [s.n.], 2016
x, 64 f. : ils. color., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2016
Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
Coorientador: Heliofábio Barros Gomes
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar - Irrigação - Evapotranspiração. 2. Agricultura de precisão. 3. Sistemas de informação geográfica. I. Zimback, Célia Regina Lopes. II. Gomes, Heliofábio Barros. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR OBTIDA POR SENSORIAMENTO REMOTO NO MUNICÍPIO DE BOTUCATU-SP

AUTOR: JANNAYLTON ÉVERTON OLIVEIRA SANTOS

ORIENTADORA: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK
Depto de Solos e Recursos Ambientais / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

PESQUISADOR ANTÔNIO HERIBERTO DE CASTRO TEIXEIRA
Embrapa Monitoramento por Satélites / EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA

Prof. Dr. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA
Depto de Solos e Recursos Ambientais / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Botucatu, 25 de julho de 2016.

“Bem sei eu que tudo podes Deus, e que nenhum dos teus sonhos pode ser impedido”
(Jó 42:2)

Dedicatória

A **Jesus Cristo**, dedico esta dissertação, por não me desamparar em meio a tantos desafios, colocando bons amigos “anjos” que me ajudaram a conduzir e concluir o mestrado.

Aos meus Pais, **Nilton Guimarães Santos** e **Reginalda Oliveira Santos**, em meio a todas as dificuldades enfrentadas durante a vida, nunca deixaram de ter fé que dias melhores viriam, encorajados sempre a seguir nos caminhos de Deus.

À minha orientadora **Célia Regina Lopes Zimback**, por acreditar no meu potencial e sempre me encorajar a lutar pelos meus sonhos, mesmo quando eu já não conseguia enxergá-los.

.....Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus por seu infinito amor e misericórdia.

A toda minha família, pelo incentivo para alcançar os meus sonhos e serem simplesmente essenciais e insubstituíveis na minha vida.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/FCA), pela oportunidade e suporte para a realização do mestrado.

À coordenação do curso de Pós-Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem), pela dedicação, assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudos.

À Orientadora Célia Regina Lopes Zimback, pelo exemplo de postura profissional, pela confiança e principalmente pelo exemplo de ser humano.

Ao Coorientador e amigo Heliofábio Barros Gomes pelos conselhos e apoio a encarar o desafio do tema da dissertação.

A Antônio Heriberto de Castro Teixeira e todos os colaboradores da Embrapa Monitoramento por Satélite, que permitiram na reta final todos os ajustes possíveis para finalizar esta dissertação.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem) pela confiança, amizade, incentivo, pontualidade e dedicação nas aulas.

Aos funcionários da Biblioteca “Professor Paulo de Carvalho Mattos” e Seção Técnica de Pós-Graduação por todo exemplar comprometimento profissional, sempre dando um suporte além do necessário.

A todos os participantes do Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas, pelo companheirismo e amizade, em especial Donizeti Nicolete, Tânia Carvalho e Roberto Filgueiras.

Aos irmãos e irmãs da igreja Assembleia de Deus em Botucatu – SP, que me acolheram muito bem, amenizando a distância dos entes queridos e me aproximando de

Deus, em especial ao meu amado Pastor Ruben Oliveira Lima, e minha amiga Lilian Silva Ferreira de Amaral.

Às irmãs de oração e conselho Ana Paula Vieira da Silva, Corina Elias da Silva, Elinete Régis da Silva e Núbia Virginea S. Santos, ao seu tempo dedicado a orações e conselhos cristãos, pois sem Cristo Jesus, não seria possível, assim como as minhas amigas e terapeutas Eliete Trombini Sartori e Sílvia Aparecida Rodrigues, por em momentos difíceis darem o suporte necessário para encontrar as melhores decisões.

À Karine Kettener pela amizade e aulas de Inglês, sua generosidade que não tem tamanho.

A todas as amizades conquistadas antes e durante o período de UNESP, foram importantes e insubstituíveis, como: Ailton, Aira, Alvaro e Ana, Andreia, Bruna, Bruno, Cássio, Cris, David, Diego, Dona Clarice, Donizete, Elvis, Falkner, Felipe, Fran, Givaldo, Jackson, Joáz, Leandro Moscoso, Lucas, Marcelo, Marcos, Maryjane, Micael, Pedro, Ramilos, Renato, Regiane, Renan, Roberto, Sara e Samuel, Tânia, Thaylison, Thiago, Guilherme (Tropeço), Ulisses, Victor, Vitor e aos amigos do convívio nas repúblicas (Alagoas, D&C, ZA, APAE, MM), no futebol dos crentes (Denilson) e da Pós Graduação (Edinho, Saulinho entre outros), da UNESP e os irmãos da Igreja minha eterna gratidão pelos momentos bons compartilhados.

Enfim a todos meus sinceros agradecimentos e eterna saudade do período de convívio.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Localização na Fazenda Boa Vista do ao município de São Manuel-São Paulo	19
2. Imagem RGB da Área de estudo com cultivo de Cana-de-Açúcar localizada na Fazenda Boa Vista do ao município de São Manuel-São Paulo	21
3. Dados Meteorológicos diários e horário dos dias julianos no período de estudo, da região com cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da Fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP	22
4. Dados Meteorológicos diários da região com cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da Fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP	23
5. Fluxograma das etapas do processamento para obtenção Evapotranspiração Horária, apartir do algoritmo de balanço de energia na superfície – SEBAL	25
6. Fluxograma das etapas do processamento para estimativa do Fluxo de Calor Sensível (H), apartir do algoritmo de balanço de energia na superfície – SEBAL...	31
7. Mapas de albedo da superfície (α_0) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da Fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.....	38
8. Mapa de índice da diferença de vegetação normalizada (NDVI) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.....	41
9. Mapa de Temperatura da Superfície (Ts) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.....	45
10. Mapas do Saldo de Radiação (Rn) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP	47
11. Mapas do Fluxo de Calor no Solo (G) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.....	50
12. Mapa do Fluxo de Calor Sensível (H) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.....	52
13. Mapa do Fluxo de Calor Latente (λET) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP	54

- 14.** Mapa da evapotranspiração diária do cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP..... **56**

SUMÁRIO

1	RESUMO	1
2	SUMMARY	2
3	INTRODUÇÃO.....	3
4	REVISÃO DE LITERATURA	6
4.1	Cana-de-açúcar	6
4.2	Água na planta.....	8
4.3	Evapotranspiração.....	10
4.4	Geotecnologias	11
4.5	Algoritmos Aplicados no Sensoriamento Remoto	13
4.6	SEBAL	15
4.7	SEBAL X Cana-de-Açúcar	17
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
5.1	Caracterização da área de estudo.....	18
5.2	Material	19
5.2.1	Imagem de Satélite	19
5.2.2	Dados Meteorológicos	22
5.3	Metodologia.....	23
5.3.1	Penman-Monteith	23
5.3.2	Algoritmo de Balanço de Energia na Superfície (SEBAL)	24
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
6.1	Albedo de Superfície (α_0).....	37
6.2	Índice de Vegetação Normalizada (NDVI).....	40
6.3	Temperatura da Superfície (TS)	43
6.4	Saldo de Radiação (Rn).....	46
6.5	Fluxo de Calor no Solo (G).....	49
6.6	Fluxo de Calor Sensível (H)	51
6.7	Fluxo de Calor Latente (λET).....	53
6.8	Evapotranspiração Real Diária ($ET_{diária}$).....	55

7	CONCLUSÃO.....	58
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1 RESUMO

A evapotranspiração é fator primordial para a contabilização do saldo de água na dinâmica solo-planta-atmosfera, desse modo, seu monitoramento é necessário para manutenção do pelo desenvolvimento de culturas agrícola. Com a necessidade de estimar a evapotranspiração em área de produção de Cana-de-Açúcar, o presente estudo objetivou-se aplicar a metodologia do algoritmo SEBAL em área de produção agrícola, para obtenção da evapotranspiração real diária ($ET_{diária}$), comparando os valores obtidos pelo algoritmo SEBAL com o modelo descrito pela FAO-56 (ET_o), correspondendo o intervalo de tempo entre cenas obtidas pelo Landsat 8, nos dias julianos (DJ) 129, 145, 161, 177, 209 e 225 do ano de 2015, as imagens do canavial da Fazenda São Manuel na região central do estado de São Paulo, pertencente ao município de Botucatu – SP. O SEBAL apresenta grande eficiência no mapeamento de grandes áreas agrícolas, a fins de monitoramento de a evapotranspiração, sendo fator limitante as poucas imagens do Landsat 8 sem nebulosidades, e o tempo de 16 dias de uma cena para outra. Os valores mapeados pelo algoritmo SEBAL demonstra plena coerência quando comparados aos valores de evapotranspiração indicados pela FAO-56, assim demonstrando grande potencial para apontar zonas críticas de déficit hídrico na cultura de Cana-de-Açúcar, e para demais culturas agrícolas.

Palavras-chave: modelagem, manejo de irrigação, agricultura de precisão.

EVAPOTRANSPIRATION OF SUGAR CANE DETERMINED BY REMOTE SENSING IN BOTUCATU – SP. Botucatu, 2016. 74p. Tese (Mestrado em agronomia/irrigação e drenagem) – Faculdade de Ciências Agrômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Jannaylton Éverton Oliveira Santos.

Adviser: Célia Regina Lopes Zimback.

Co-Adviser: Heliofábio Barros Gomes

2 SUMMARY

Evapotranspiration is major factor in accounting for the water balance in the soil-plant-atmosphere dynamics, thereby, its monitoring is needed to maintain the development of agricultural crops. With the need to estimate evapotranspiration in cane sugar production area, the present study aimed to apply the methodology of SEBAL in agricultural production area, to obtain the daily evapotranspiration (ETdiária) comparing the values obtained by SEBAL to the model described by FAO-56 (ETo), corresponding to the time interval between scenes obtained by Landsat 8 in Julian days (DJ) 129, 145, 161, 177, 209 and 225 of the year 2015, images of the plantation of Fazenda São Manuel in the central region of São Paulo, in the municipality of Botucatu - SP. The SEBAL presents great efficiency in mapping large agricultural areas, the monitoring purposes of evapotranspiration, and limiting factor the few images of Landsat 8 without cloudiness, and time of 16 days from one scene to outra. Os values mapped by SEBAL demonstrates full consistency when compared to evapotranspiration values indicated by the FAO-56, demonstrating great potential to point critical drought areas in Cane Sugar culture, and other crops.

Keywords: modelling, irrigation management, precision agriculture.

3 INTRODUÇÃO

A gestão e o manejo de grandes áreas agrícolas vêm-se tornando um desafio para empreendedores e pesquisadores. A dificuldade de acesso, ou melhor, visão como um todo faz-se a necessidade de uma melhor exatidão desta gestão envolvendo o setor agropecuário. O uso de Sistemas de Informação Geográfico (SIG), a cada dia, ganha espaço em pesquisas direcionadas às extensas superfícies, auxiliando geoprocessamento, sensoriamento remoto e agronomia.

O Brasil sempre apontou o setor agrário como base econômica e, mesmo após várias gerações, o setor sucroalcooleiro tem sua importância direta como fonte do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Assim, o setor vem recebendo investimentos de pesquisas científicas e nas expansões de áreas canavieiras. A cana-de-açúcar apresenta resistência ao estresse hídrico por isso, na grande maioria das regiões, cultiva-se na dependência de chuvas. São efetuadas pesquisas destinadas ao melhoramento genético, para adaptação da cultura à climatologia da região.

Mesmo com plantas resistentes às condições adversas do clima, a produtividade da Cana-de-Açúcar potencializa-se com planejamento hídrico, dado pelo monitoramento do consumo hídrico e reposição de água no solo. Deste modo, há necessidade do monitoramento da evaporação (do solo) e transpiração (da planta). Esta

somatória poderá ocasionar um saldo negativo no sistema (solo-planta), devido à ausência de reposição de água pela chuva e irrigação.

As estimativas da evapotranspiração podem ser realizadas por modelos matemáticos ou equipamentos de monitoramento em campo. Em grandes extensões territoriais, há necessidade de monitoramento da evapotranspiração, no entanto, torna-se inviável uso de equipamentos e uso de mão de obra, desse modo, ferramentas que venham possibilitar a precisão com baixo custo, torna o sensoriamento remoto e o geoprocessamento uma das melhores alternativas para agricultura de precisão devido as dificuldades de representação da evapotranspiração em larga escala através de medições pontuais, para os grandes e médios cultivos.

As estimativas de uso de água e monitoramento do sistema agrícola as distâncias estão sendo usados pelas principais potencias econômicas mundiais, assim, minimizando as perdas de produção e aumento da lucratividade, devido melhor planejamento. O domínio da técnica do algoritmo de balanço de energia na superfície (SEBAL) torna-se um ponto de partida para o avanço da ciência agrária brasileira, devido ainda ser pouco usado na avaliação da evapotranspiração sendo um reflexo direto no auxílio e ajustes dos parâmetros de mensuração hídrica. Então o sensoriamento remoto torna-se uma ferramenta poderosa no auxílio da estimativa da produtividade da água na cultura.

O Estado de São Paulo vem apresentando crise na distribuição hídrica nas cidades, afetando a saúde pública e o bem-estar humano. A agricultura com as estiagens vem apontando a necessidade de irrigação para suprir a demanda hídrica das culturas, no entanto, a falta de planejamento dos recursos hídricos urbano mostra impacto direto na outorga de uso de água para irrigação. Estes fatores tornaram-se um grande paradigma para a ciência melhorar a eficiência o manejo dos equipamentos de irrigação ou melhorar o planejamento dos recursos naturais como a água. A presente pesquisa visou auxiliar na otimização e planejamento da água na Cana-de-Açúcar, aumentando a produtividade com a reposição de água mais próximo do necessário evitando, assim, o uso abusivo de recurso hídrico, um bem sempre indispensável e cada vez mais escasso em cenário mundial.

Para isso, os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- aplicar a metodologia do algoritmo SEBAL em área de produção de Cana-de-Açúcar, para obtenção da evapotranspiração real diária (ET_r);

- comparar os valores obtidos no mapeamento da ET pelo algoritmo SEBAL em área de Cana-de-Açúcar com o modelo Penman-Monteith descrito pela FAO-56 (ET_o);

- correlacionar a evapotranspiração instantânea e diária especializadas pelo SEBAL em Cana-de-Açúcar com o modelo proposto pela FAO-56, diagnosticando a existência de estresse hídrico da planta.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) vem sendo introduzida no Brasil desde o período colonial, em diferentes regiões, ao qual é pertencente à família das gramíneas, e denominada uma cultura semi-perene com propagação vegetativa ou com mudas originárias de perfilhamento. A época de corte pode variar de 10 a 24 meses de idade, sendo seu período de colheita estimado de 2 a 8 meses dependendo da área de fornecimento e capacidade produtiva da usina de açúcar, álcool ou ambas (MAPA, 2015; CARVALHO et al., 2011; SILVA et al., 2015).

No ano de 2012, a queda de preço do açúcar estimulou o uso da cana-de-açúcar como forragem, nos processos bioenergéticos entre outras finalidades, assim ampliando os incentivos às pesquisas para novas variedades. O país dispõe de diferentes variedades, facilmente encontradas, conforme descrito por Marin (2016), no catálogo da Agência Embrapa de Informação Tecnológica – AGEITEC, no qual estas podem ser escolhidas de acordo com a finalidade (açúcar, álcool, híbrido, forragem, bioenergia) e as condições ideais para desempenhar seu potencial produtivo.

Os principais centros de pesquisas em melhoramento genético no âmbito de adaptabilidade a diferentes cenários e técnicas de produção são Ridesia – RB da Planalsucar (RB70141, RB70194, RB935744, RB925268, entre outras), Copersucar (SP) – CTC (SP77-5181, SP80-3280, CTC 1, CTC 2, entre outras) e o Instituto Agrônomo de Campinas – IAC (IACSP95-3028, IACSP93-2060, IAC86-2210, IAC87-3396, entre outras), com o objetivo de inserir no mercado brasileiro variedades que expressem maior potencial produtivo com menor custo de produção (MARIN, 2016).

A Cana-de-Açúcar divide-se em raiz, caule e folha, onde o caule ou talo é a parte mais importante devido a composição de glicose e frutose “açúcares”, material inorgânico, substâncias azotadas, gomas, ceras e ácidos orgânicos (3%), sacarose (12%), fibras (15%) e água (70%), sistema fisiológico C4, têm uma maior eficiência no uso de luz, sendo resistente a temperaturas entre 30 a 45 graus, apresentando taxas respiratórias e, conseqüentemente, menor consumo de água, em seu desenvolvimento quando comparado a planta de fisiologia trigo (C3) ou comparado ao milho (C4) (WONG SAK HOI; MARTINCIGH, 2013).

No anuário de 2011/2012, Carvalho et al. (2011) relataram que no Brasil a cana-de-açúcar apresenta grande importância econômica para o PIB (Produto Interno Bruto), visto que o Brasil, com 25% da produção mundial, é um dos maiores produtores de combustível a base de etanol originário da cana-de-açúcar e é importante exportador de açúcar para o mercado internacional. O estado de São Paulo apresentou na safra 2011/12 uma produção de 309,76 milhões de toneladas estando mantendo-se o maior produtor de cana-de-açúcar do país, isso é decorrente ao aumento de 4,7% na produção nacional, que gerou entorno de 8,4 milhões de hectares de cana-de-açúcar com a produção de 69,8 t/ha.

O MAPA (2015) descreveu uma tendência de aumento de produção de 3,25%, até 2018/19, proporcionando um acréscimo na exportação de 32,6 milhões de toneladas, apontando uma projeção positivas para o cenário do etanol devido ao acréscimo de consumo de biocombustível, sendo no ano de 2019 (58,8 bilhões de litros), o dobro de 2008, deste modo, uma expansão de 8,8 bilhões devido o consumo interno ser de 50 bilhões de litros.

Com o ZAEcana (Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar), o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento irá regular o plantio da cultura, considerando o meio ambiente e aptidão econômica, embasado em clima, solo, biomas e

necessidade de irrigação. O fator água torna-se limitante para a cultura, devido ao alto percentual de área canavieiras ser cultivadas na dependência de chuvas, deste modo, o planejamento hídrico, com base no mapeamento da evapotranspiração da cultura torna-se fundamental durante seu ciclo para que a mesma venha a desempenhar seu potencial produtivo (JENA; POGGI, 2013).

Silva et al., (2011b) relataram a demanda hídrica e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro, com valores de resposta hídrica da cultura irrigada, quanto à lâmina de água (precipitação + irrigação) disponível valores de 5,36 kg de colmos, 0,69 kg de açúcar e 494,14 ml de álcool por metro cúbico de água.

4.2 Água na planta

A absorção de água pela planta dar-se pelo diferencial de potencial hídrico dentro do sistema fisiológico (C3, C4 e CAM), característico das diferentes espécies vegetais agrícolas. O processo fotossintético é regulado pela luz, CO₂, água e temperatura. Onde a luz no espectro do azul, vermelho e infravermelho é absorvida para transferência de elétrons que fotoxidação, com a molécula de água, liberando o O₂ e usando o hidrogênio para ativar os fotossistemas, inicia-se o processo de fotossíntese. O segundo processo dar-se pela captação de CO₂ pelos estômatos, regulado pela turgescência da parede celular, devido à mudança do estado da água (líquida para vapor), desencadeada pela temperatura e sua perda para atmosfera. O ciclo de Calvin ou ciclo de fixação de carbono é proveniente da carboxilação, redução e regeneração do carbono em plantas conhecidas como C₃ (TAIZ; ZEIGER, 2013).

O processo metabólico de plantas C₄ demanda de oxalacetato, assim utilizando a enzima PEP carboxilase ao invés da rubisco, ou uso de 4 carbonos, sendo sua fixação de carbono no processo de carboxilação, descarboxilação e regeneração, diferentemente da planta C₃ que utiliza 3 carbonos (3-fosfoglicerato). O metabolismo do ácido das crassuláceas - CAM é similar ao C₄, com a diferença no período do dia em que se realiza a síntese de CO₂, tendo a maior eficiência na economia de água, onde a carboxilação é feita no período noturno onde a menor perda de água (estado de vapor) para atmosfera, já a descarboxilação no período da diurno, utilizando o CO₂ capturado em

forma de malato, armazenado no vacúolo para fotossíntese com os estômatos fechado (TAIZ; ZEIGER, 2013). O desenvolvimento vegetativo das culturas agrícolas com sistema C3, C4 ou CAM, está diretamente ligado a três princípios básicos: água, nutriente e ambiente. A água é o fator primordial para o desenvolvimento de qualquer vegetal, devido ao ambiente poder ser controlado e sobreviver com a ausência de alguns nutrientes, apesar de não apresentar um bom aspecto, muitas das culturas agrícolas desenvolvem-se com deficiência nutricional (TAIZ; ZEIGER, 2013).

A composição da planta, em grosso modo, descreve-se tecido vegetal e água e, deste modo, o protoplasma rico em proteínas e lipídeos há 85 a 90% de água, os cloroplastos, contêm 50% de água, as folhas contêm 80 a 90% e as raízes de 70 a 95%. A água faz-se presente na condução de nutrientes, minerais e gases entre células, nos processos fisiológicos (fotossíntese), além de participação direta no crescimento vegetal (turgescência das células), estabilidade térmica, transporte no xilema e movimentos reversíveis no vegetal (LACERDA, 2007).

BRILLANTE et al. (2016), avaliando as variações no uso de água no solo pela videira, de acordo com a condição hídrica da planta e características do solo, descreveram a dinâmica da água-solo-planta e a experiência da reação fisiológica ao estresse hídrico e a importância deste monitoramento da água nesta dinâmica.

A água pode ser disponibilizada para a planta por meio da chuva, ascensão capilar de lençol freático próximo e irrigação, podendo ser quantificada através do balanço hídrico, resultante da dinâmica solo-planta-atmosfera (SILVA et al., 2015a). A planta pode apresentar déficit hídrico com a transferência de água para atmosfera pela transpiração, outra maneira pode dar-se com a não absorverem água no solo pelas raízes ou, em solos salinos, onde a planta pode perder água para o solo devido à diferença de potencial raiz-solo (KLAR, 1984; PRIETO et al., 2012; TAIZ; ZEIGER, 2013).

A movimentação da água no solo para a planta dá-se por diferença de potencial. Tornando-se possível com a transpiração da planta que proporciona a translocação de solução da raiz para a parte aérea, no processo de fotossíntese, através da perda de água dos estômatos para a atmosfera. Quantificar a água perdida em uma lavoura pela evapotranspiração (o que foi perdido pelo solo e pela planta de acordo com fatores atmosféricos), em condições potenciais pode-se contabilizar a demanda hídrica da planta (KLAR, 1984; TAIZ; ZEIGER, 2013).

4.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração é descrita como transferência de água pela planta e solo, para atmosfera, onde a água passa do estado líquido para o gasoso (REICHARD; TIMM, 2012). Considera-se um somatório da perda de água pela planta por meio da transpiração e do solo pela evaporação. Os fatores atuantes decorrentes da redução de umidade na atmosfera, aliado à temperatura, vento, radiação solar e pressão barométrica, causando um potencial negativo fazendo com que a água transloque ou ascenda até se transformar em vapor e compor os gases atmosféricos (KLAR, 1984).

A quantificação do volume de água perdida para a atmosfera em estado gasoso direciona a diferentes conceitos da evapotranspiração (ET): Evapotranspiração Potencial (ETp), Evapotranspiração Real Diária (ETr) e Evapotranspiração de Referência (ETo). A ETp é toda perda de água no solo sem déficit hídrico, com ou sem presença de vegetação em determinado período (KLAR, 1984; THORNTHWAITE, 1944). Bastiaanssen (2000) definiu a fração evaporativa como ET, sendo uma razão entre o fluxo de calor latente e a diferença entre o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo, sendo indicativo simples e direto das condições de umidade do solo.

Pereira et al. (2015) descreveram a ETo como a evapotranspiração em superfície com vegetação de grama (8 a 15 cm) ou alfafa (12 a 18 cm). A grama é adotada pela FAO56, referente ao trabalho de Doorenbos e Pruitt (1977), como uma superfície de referência sendo hipoteticamente coberta de forma uniforme e verde. A partir da ETo, pode-se encontrar a Evapotranspiração da Cultura (ETc), produto resultante da ETo pelo Coeficiente da Cultura (Kc), onde o Kc é diretamente relacionado aos estágios fenológicos (fisiologia vegetal da planta) e as condições climáticas (ALLEN et al., 1998).

A contabilização da ETc é fundamental para a reposição de água no sistema, tendo em vista potencializar o rendimento da planta, de acordo com a sua demanda hídrica. Desse modo, na ausência de equipamentos em campo (lisímetros, sondas capacitivas, taque classe A e estação agrometeorológicas) para o cálculo da ETo possibilita a retirada de dados para estimativa, sendo possível através de modelos matemáticos estimar a evapotranspiração do local próximo ao real (KLAR, 1984; REICHARD; TIMM, 2012).

O monitoramento da ETo permite identificar o requerimento hídrico assim uma economia de água do sistema hídrico local em uma superfície vegetada,

desse modo, cada cultura agrícola apresentará uma necessidade de água específica, de acordo com o coeficiente de cultura (K_c), que com as condições climáticas, o local e espécie vegetal (LI et al., 2003). ALLEN et al. (1998) tabelaram e calibraram valores para coeficientes de culturas em diversos estágios fenológicos em diferentes ambientes e métodos, assim, quantificação o K_c para computação da evapotranspiração da cultura (ET_c), podendo ser usados para irrigação em locais que não há estudos ou calibração dos coeficientes.

A estimativa ou quantificação da evapotranspiração de referência (ET_c) e coeficiente (K_c) de cultura dar-se por diferentes métodos de acordo com Trajkovic e Kolakovic (2009), que menciona os modelos da FAO-56 Penman-Monteith, Thornthwaite, Hargreaves, Turc, Priestley e Taylor, Jensen e Haise, onde estas modelagens são alimentadas por dados meteorológicos diversos, de acordo com as disponibilidades. Assim como AVENDAÑO et al. (2015), estudando componentes do ciclo hidrológico e balanço de energia para um eficiente uso de água na irrigação, com o objetivo de monitorar a ET e determinar o K_c , decreveram a importância do uso de técnicas como correlações turbulentas, lisímetros, razão de Bowen, equilíbrio de água no solo, além dos modelos de estimativa a partir do sensoriamento remoto. Vanderhoof e Williams (2015) utilizaram a ET estimada pelo satélite MODIS em floresta de pinheiro, para quantificar os eventuais ataques de insetos e morte das árvores.

SANTOS et al. (2010) avaliaram a precisão da ET_o diária, utilizando algoritmos em sensoriamento remoto (SR), comparados com os valores obtidos em campo pelo método da razão de Bowen na cultura do algodão, diagnosticando resultados satisfatórios para resolução de trinta metros do Landsat. TANG et al. (2013) descreveram os procedimentos e as precauções que devem ser tomadas ao analisar informações das imagens de satélites no processamento para determinar a ET_c .

4.4 Geotecnologias

O geoprocessamento é uma ciência operacional de dados espaciais, com técnicas matemáticas e computacionais que possibilitam a classificação e geocodificação de informações geográficas, permitindo a detecção de mudanças temporais e processamento dos metadados, conforme anotação geográfica e cálculo estatístico,

através de análise de redes e transformações de coordenadas, deste modo, podendo ser aplicado em diferentes áreas da ciência (ISO, 2005; ZHAO et al., 2012).

Conforme Wu et al. (2013), geoprocessamento tem como objetivo melhorar as complexas tarefas de Sistema de Informações Geográficas (SIG), sendo uma sequência operacional obtida por uma série de instrumentos como modelos e scripts. Possibilitando uma simulação da realidade, apresentando ferramentas de entrada e de saída do conjunto de dados, a criação de modelos para uso posterior, através de interpolação de um conjunto de pontos, podendo resultar em um polígono ou demarcação de uma área.

O geoprocessamento apresenta parâmetros de influência nos avanços das pesquisas em Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia, Planejamento Agrícola e Urbano e, deste modo, nas análises de dados complexos em diferentes áreas da ciência, permitindo análise com ferramentas computacionais como o GIS - Geographic Information System, possibilitando uma criação de banco de dados georreferenciados (CÂMARA et al., 2001).

Usando uma ferramenta SIG para a modelagem de evapotranspiração real, España et al. (2012) descreveram o sistema como uma ferramenta fundamental no processamento de informações espaciais, inserindo variáveis ambientais de influência no balanço hídrico, estimando a evapotranspiração real da cultura, por meio de modelos desenvolvidos (LUDWIG; MAUSER, 2000; PORTOGHESE et al., 2005). A modelagem espacial para estimativa da evapotranspiração em grande escala é permitida por imagens de diferentes satélites e modelagens através do SIG, possibilitando uma melhor gestão de tomadas de decisão no manejo da cultura e irrigação (GOLZÁLEZ-DUGO et al., 2013).

Golzález-Dugo et al. (2013) relataram que, em diferentes resoluções de dados originários do sensoriamento remoto, por imagens de satélites vem despertando interesse da comunidade científica, devido aos balanços de energia para estimar troca de energia e massa entre a superfície e a atmosfera, mesmo sem a necessidade de contabilidade de processo hidrológicos e heterogeneidade superfície terrestre e consistência dos requisitos de dados de modelos complexos de evapotranspiração.

A aquisição de informações sobre uma região com a ausência de contato físico é dada pelo sensoriamento remoto, podendo-se monitorar parâmetros de superfície através de sensores contidos em diversos satélites, aeronaves e outras

plataformas, com finalidade de levantamento terrestre, cartografia e mapeamento temático. Em regiões de difícil acesso torna-se indispensável o uso de sensoriamento remoto, principalmente, na nova agricultura brasileira, onde o consumo hídrico e a produção com a eficiência da cultura em produção podem ser estimados sem necessidade de contato com todas as plantas (NOVO, 2008).

Com o sensoriamento remoto aplicado à Cana-de-Açúcar, Aguiar et al. (2009) relataram aspectos para o monitoramento da colheita com e sem o uso de fogo, no estado de São Paulo, utiliza-se das imagens do satélite Landsat 5 -Thematic Mapper, cujo monitoramento só foi possível de ser realizado devido ao tempo de 16 dias que o mesmo leva para recobrir a mesma área canavieira.

4.5 Algoritmos Aplicados no Sensoriamento Remoto

Os algoritmos aplicados no Sensoriamento Remoto são compostos por equações ajustadas para adequar técnicas para diferentes escalas, gerando informações aplicáveis, sem a necessidade de contato físico, proporcionando uma melhor compreensão de alvos distintos. Estes algoritmos são usados com diferentes objetivos, existindo um crescente interesse científico nas pesquisas em recursos naturais, envolvendo água, solo e vegetação (PONZON et al., 2012).

Na década de 40, o Brasil iniciava o período de mapeamento temático no projeto RadamBrasil, com o uso das fotografias aéreas, assim subsidiando mapas para estudos sobre recursos naturais (geologia, geomorfologia e solos), em poucos anos o país capacitou profissionais em técnicas de sensoriamento remoto com produtos do satélite Landsat, visando a elaboração de novos mapas temáticos, em processamento de imagens por classificação automática, finalizando-se o projeto RadamBrasil (PONZON et al., 2012).

Na década de 80, com a demanda pelo conhecimento da vegetação brasileira, incentivaram-se a classificação e quantificação de espécies nativas e agrícolas (cana-de-açúcar e feijão). De acordo com os mapas temáticos gerados a partir de imagens de satélite, iniciaram-se inventários ambientais e florestais, quantificação de matas nativas e delimitação de áreas de preservação em diferentes biomas como mata Atlântica, caatinga,

Amazônia entre outros, permitindo aferições em campo de maneira mais precisa (PONZON et al., 2012).

Na década de 90, as pesquisas migram de caráter qualitativo para quantitativo, com estimativas de índices de área foliar (IAF) e biomassa originários de dados radiométricos, captados por sensores orbitais (PONZON et al., 2012).

Por meio de dados radiométricos oriundos da interação fisiológica da absorção de radiação e pigmentos fotossintetizantes, devidamente ajustado com aferições em laboratório da parte do tecido vegetal de diferentes espécies, permite estimativa remota da evapotranspiração, assim, como a demanda hídrica, estágio fisiológico, estado nutricional e sanitário de diferentes espécies. A agricultura por sua vez, vem tendo uma demanda intensiva neste âmbito, de aplicação de modelos matemáticos (algoritmos aplicados) para a previsão de safra, os modelos gerados precisam de ajustes em diferentes cenários hídricos, de produção e climatológico, desse modo, a validação e calibração em larga escala, proporcionam precisão e confiabilidade aos pesquisadores, produtores e responsáveis na área agrônômica (PONZON et al., 2012).

O monitoramento temporal e espacial dos balanços de energia e da água, torna-se viável com imagens de satélite como Landsat, MODIS, RapidEye, Spot e Geoeye, em extensos talhões agrícolas (WARREN et al., 2014). A contabilização da necessidade e uso de água em diferentes condições ambientais pode ser realizada em diferentes métodos (CABRAL et al., 2012; GALEANO et al., 2013), mas, há necessidade do auxílio do sensoriamento remoto (SR), sistema de informação geográfico (SIG) e um conjunto de dados meteorológicos (PONZON et al., 2012).

Estima-se a produtividade com algoritmos aplicados computando a conversão da planta da energia solar em fibra e óleo, e o consumo de carbono (CESCHIA et al., 2010). Algoritmos como o de Bastiaanssen (2000), descrevem por meio de modelos matemáticos, a partir do *Surface Energy Balance Algorithms for Land - SEBAL*, o monitoramento da evapotranspiração em diferentes escalas espaciais com imagens de satélite e dados básicos meteorológicos (BASTIAANSEN et al., 1998; TEIXEIRA et al., 2009).

O METRIC (Mapping Evapotranspiration at high resolution with Internalized Calibration) segue todos os passos do SEBAL e não requer muitas variáveis meteorológicas em nível de superfície onde o pixel frio é selecionado dentro de uma área irrigada (ALLEN et al., 2005; LIRA, 2008; TASUMI et al., 2005).

O *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* – SAFER, elaborado por TEIXEIRA et al. (2014a), é um algoritmo desenvolvido no Brasil para obtenção de todos os componentes do balanço de energia, possibilitando a estimativa a ET.

4.6 SEBAL

Os sensores de satélite permitem a estimativa de parâmetros como índice de vegetação, saldo de radiação, temperatura da superfície e balanço de energia na superfície que a partir dela pode-se estimar a evapotranspiração real diária em diferentes escalas espaciais e temporais. As diferentes resoluções de sensores (espaciais, espectrais e radiométricas) obtidos por diferentes sensores, exige uma certificação da estimativa da ET. A partir do algoritmo de balanço de energia na superfície (SEBAL), pode-se estimar a ET, dentre as análises e processamentos das informações dos dados obtidos por satélite.

O SEBAL, por meio de modelos matemáticos (25 etapas), possibilita a estimativa ETr e ETp em cada pixel, a partir das radiações espectral (infravermelho próximo, visível e térmica do espectro), sendo computado todos os componentes dos balanços de radiação e energia, no momento da passagem do satélite. O algoritmo tem como requisito básico a imagens de satélite e dados meteorológicos como velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar e temperatura do ar (ANNEX, 2015).

A interação entre a superfície vegetada e os fluxos radiativos, interfere diretamente no fluxo de calor necessário para ocasionar a passagem de água do estado líquido para o gasoso (BASTIAANSSEN et al., 1998; ROERINK; SU; MENENTI, 2000). Isto é decorrente da troca de energia solo-planta-atmosfera, proveniente do saldo de radiação (R_n), composto pelos dos fluxos de calor no solo (G), sensível (H) e latente (LE). LIU (2007) afirma que a energia necessária para evaporar a água é computada pelo fluxo de calor latente ($W\ m^{-2}$), no balanço de energia assim podendo ser convertido para evapotranspiração em $mm\ dia^{-1}$ (MACHADO et al., 2014).

Machado et al. (2014) descreveram como ondas eletromagnéticas disponíveis para aquecimento do solo, do ar e ativação de fotossistemas (início da fotossíntese), resultante na evapotranspiração. O fluxo é a energia necessária para aquecer o solo, que varia de acordo com condições hídricas a classificação e ocupação do solo,

sendo necessário para obtenções destes valores, a quantificação do Índice de Vegetação Normalizada (NDVI- Normalized Difference Vegetation Index), temperatura de superfície, albedo e R_n . Com a teoria de similaridade de Monin-Obukov em um processo iterativo, a partir da estabilidade atmosférica, é encontrado, para tal é necessário dois píxeis âncoras (quente e frio) representantes de extremos valores de ET. É resíduo na equação do balanço de energia, podendo obter-se a fração evaporativa instantânea – FE (BASTIAANSEN, 2000; BASTIAANSEN et al., 1998).

As equações empíricas do SEBAL apresentam erro médios em diferente superfície de 20, 10 e 1% a depender da calibração em campos experimentais, a nível regional, assim, tendo representatividade prática no mapeamento da evapotranspiração, em áreas homogêneas e heterogêneas (BASTIAANSEN, 2000). As medições de campo da ET terrestres comparadas ao SEBAL, descritas por Bastiaanssen et al. (2005), mostraram uma precisão da evapotranspiração de até 15% no SEBAL e de 5% nas medições terrestre, no entanto Hong (2008) encontrou precisão de $\pm 10\%$ no sudoeste dos EUA.

A utilização de imagens de satélite (Landsat, NOAA ou Terra/Aqua) para elaboração de mapas de evapotranspiração, pode ser realizado em diferentes resoluções espaciais, de acordo com o tamanho do pixel das imagens, deste modo, sua abrangência têm diferentes escalas para as diferentes finalidades de estudos. O SEBAL no Brasil vem sendo calibrado e ajustado em bacias hidrográficas, lavouras, áreas de preservação nativa, silvicultura entre outros ramos de aplicações em diferentes regiões do mundo como: (LI et al., 2013; MAHMOUD; ALAZBA, 2016; SUN et al., 2011; TANG et al., 2013; YANG et al., 2015; ZHANG et al., 2011; ZHOU et al., 2014).

Na gestão hídrica a quantificação da evapotranspiração é fator preponderante para implementar culturas agrícolas ou prever perda de rendimento produtivo por estresse hídrico. Deste modo, acompanhar o balanço de água em cultivos agrícolas torna-se essencial, no planejamento agrícola, assim como YANG et al. 2015 descreveram a aplicabilidade do modelo SEBAL a nível regional na cultura de milho verão e trigo inverno em Hunang-Huai Plain – China.

Hong et al. (2009) propuseram que imagens obtidas por satélite como Landsat podem ser validadas com medições de campo. Devido a resolução do Landsat ser menor que 100m, diferentemente do satélite MODIS com faixa térmica ultrapassando os 100 m, dificulta medidas de validação de campo. No entanto, modelos de

estimativa de ETo da FAO-56, descrito por Allen et al. (1998), poderá ser um ponto de partida para a validação dos dados de evapotranspiração obtidos por meio do Landsat e partida desta validação, valida-se os dados obtidos pelo MODIS.

4.7 SEBAL X Cana-de-Açúcar

A pesquisas com o SEBAL voltadas a bacias hidrográficas de macro a microrregiões, na finalidade de monitorar o balanço hídrico. Com finalidade pratica e aplicada, a produção agrícola tem a necessidade de estudos em culturas com importância no cenário nacional, como a da Cana-de-Açúcar.

Estudos como o de MACHADO et al. (2014), que visaram a estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM–Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco, com pretensões de estimar e comparar o SEBAL, em diferentes vegetação e solo, para validação com medições de campo do algoritmo na região. Encontrando viável a capacidade de estimativa do SEBAL nas diferentes condições, quantificando o uso de saldo de radiação líquida para diferentes fisiologias de planta, como elaboração do mapa de evapotranspiração para as regiões canavieiras das imagens.

O uso de Sensoriamento Remoto para estimar Rn em áreas de Cana-de-Açúcar e Cerrado foram descritos por Giongo et al. (2010b), com utilização de imagens do LANDSAT 5 e, validando com estações micrometeorológicas em região de cerrado e Cana-de-Açúcar, com coeficientes de correlação de 0,994 e 0,984, respectivamente, proporcionou a geração de mapas temáticos.

LIRA (2008), na obtenção de parâmetros biofísicos de evapotranspiração da cana-de-açúcar mediante imagens orbitais na região do sub médio São Francisco, apontaram valores de ET devidamente ajustados, permitindo concluir que as informações captadas pelo algoritmo na cultura, foram bastante satisfatórias.

Os pesquisadores locais ficaram encorajados, devido a eficiência do algoritmo no monitoramento da água usada na agricultura irrigada, além da obtenção de dados como: coeficiente da cultura, monitoramento dos níveis de biomassa fresca, carbono sequestrado, e avaliação dos níveis de produtividade da água na Cana-de-Açúcar (LIRA, 2008).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo localiza-se na Fazenda São Manuel na região central do estado de São Paulo, pertencente ao município de Botucatu, situando-se a 8 km do centro urbano na altitude de 520 m, nas coordenadas 22° 45' 36" de latitude sul e 48° 25' 12" de longitude a oeste de Greenwich (Figura 1).

Segundo a EMBRAPA (2013), o solo é classificado em LATOSSOLO VERMELHO Distroférico (LRdf). O clima de acordo com Koeppen é caracterizado como tropical de altitude (Cwa), com temperaturas ao longo do ano de 12 a 29°C, proporcionando um verão quente e um inverno seco, deste modo, na climatologia local.

A variedade de cana-de-açúcar (RB86 7515) cultivada na área apresenta uma precocidade em maturação e boa soqueira, sendo o seu comportamento fenológico do crescimento na Tabela 1, deste modo, foi avaliado a cultivar no âmbito de se observar o mapeamento do comportamento evapotranspirativo, nos dias 09/maio, 25/maio, 10/junho, 26/junho, 28/julho e 13/agosto do ano de 2015, dias estes, escolhidos devido as imagens disponíveis para realizar as análises.

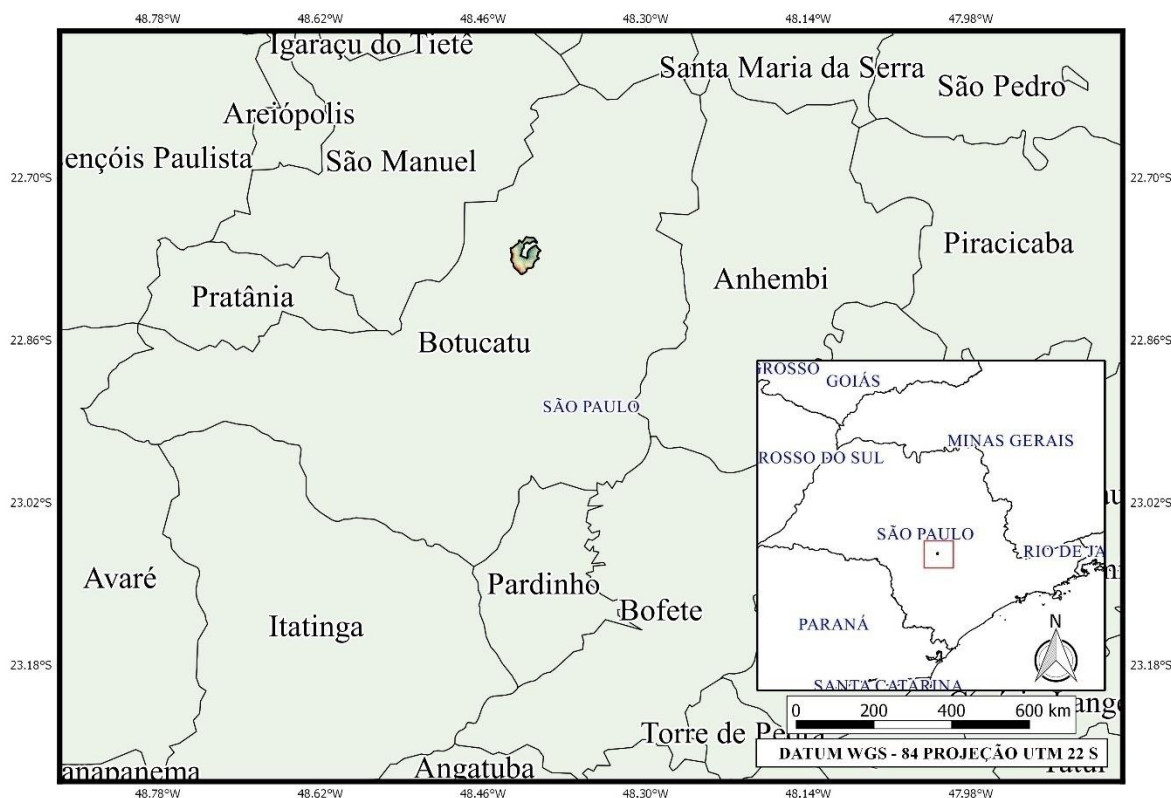


Figura 1. Localização da Fazenda São Manuel do ao município de Botucatu-São Paulo.

Tabela 1. Estádios fenológicos do crescimento da Cana-de-Açúcar localizada na Fazenda São Manuel no município de Botucatu-São Paulo, nos períodos de análises das imagens do Landsat 8.

Cana-de-Açúcar (RB86 7515)			
Maio	Junho	Julho	Agosto
12	Colheita	Rebrota	Fase inicial
Período máximo de maturação		Período de repouso fisiológico	

Fonte: Sartori (2014).

5.2 Material

5.2.1 Imagem de Satélite

As análises realizadas na propriedade, foram realizadas com imagens obtidas através do Landsat-8 dos nos dias Julianos de 125 (09/maio), 145 (25/maio), 161 (10/junho), 171 (26/junho), 209 (28/julho) e 225 (13/agosto) do ano de

2015, desde a fase de plena maturação colheita (Maio/2015) a rebrota (Julho/2015) visando obtenção da evapotranspiração em diferentes períodos no ciclo da cultura. As imagens de satélite (Figura 2) possuem 11 bandas espectrais (Tabela 2), com resolução temporal de 16 dias, resolução radiométrica de 16 bits e resolução espacial de 15, 30 e 100 m, estando disponível no portal GLOVIS: The USGS Global Visualization Viewer.

Tabela 2. Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS)

Instrumentos	Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (metros)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Banda 1-Coastal aerosol	0,43 – 0,45	30
	Banda 2-Azul	0,45 – 0,51	30
	Banda 3-Verde	0,53 – 0,59	30
	Banda 4-Vermelho	0,64 – 0,67	30
	Banda 5- Infravermelho próximo (NIR)	0,85 – 0,88	30
	Banda 6-SWIR 1	1,57 – 1,65	30
	Banda 7-SWIR2	2,11 – 2,29	30
	Banda 8-Pancromaica	0,50 – 0,68	15
	Banda 9-Cirrus	1,36 – 1,38	30
	Banda 10-Termal infravermelho (TIRS)	10,50 – 11,19	100*
	Banda 11- Termal infravermelho (TIRS)	11,50 – 12,51	100*

* TIRS bandas foram adquiridas com resolução de 100 metros, mas foram reamostrados para 30 metros em dados de entrada (USGS, 2013).

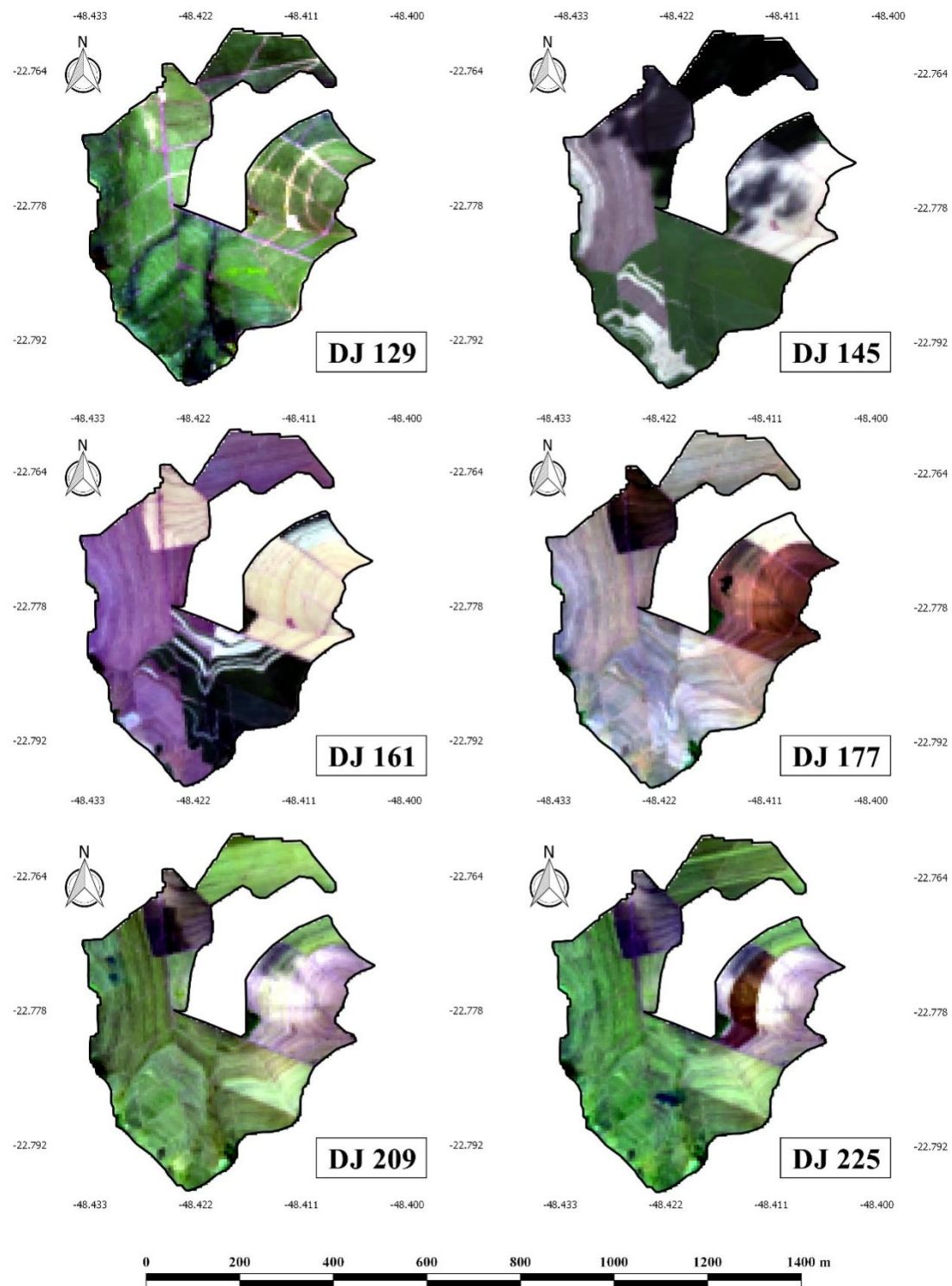


Figura 2. Imagem RGB da Área de estudo com cultivo de Cana-de-Açúcar localizada na Fazenda São Manuel do ao município de Botucatu-São Paulo.

5.2.2 Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos para o período de estudo foram obtidos na Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista - UNESP, do Campus Botucatu – SP.

As variações dos pontuais dos dados horários podem ser observadas na Figura 3, onde os maiores valores de temperatura do ar encontram-se em 22,8 °C no DJ – 145, umidade relativa do ar em 78% e velocidade do vento de 4 m.s⁻², onde não foram registradas ocorrências de chuva nos dias do estudo, no entanto, as maiores precipitações acumuladas durante o período de estudo foram 88,65 e 113,8 mm em maio e julho, respectivamente.

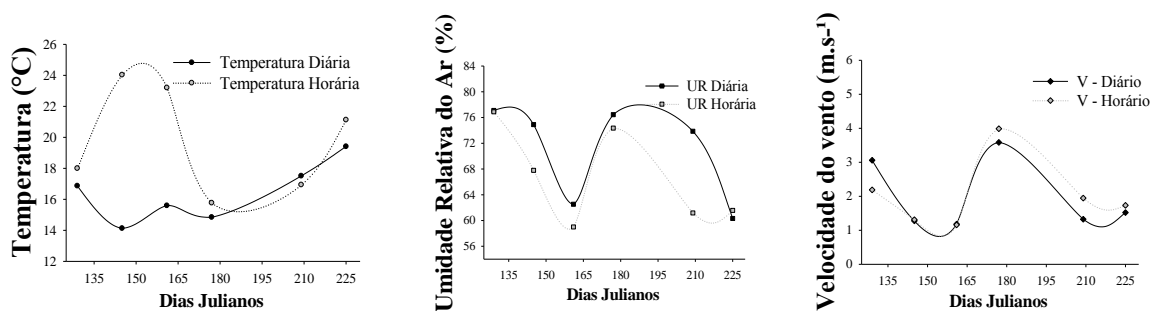


Figura 3. Dados Meteorológicos diários e horário dos dias julianos no período de estudo, da região com cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da Fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.

Os dados meteorológicos na escala diária a precipitação (P), temperatura do ar (Ta), velocidade do vento (u) a 2 metros de altura, umidade relativa (UR), radiação global (Rg) e evapotranspiração de referência (ET_o) para todo o período de 2015, sendo os dados horários (Figura 4) apenas abrangentes nos dias de 09/maio (DJ-129), 25/maio (DJ-145), 10/junho (DJ-161), 26/junho (DJ-177), 28/julho (DJ-209) e 13/agosto (DJ-225).

A temperatura do ar tem maiores valores nos meses de Janeiro e Outubro, consequentemente, menores umidades do ar na ausência de chuvas, que foram de janeiro a abril e de setembro a dezembro (Figura 4). Como nesse período há maior ocorrência de nebulosidade, assim, há menor disponibilidade de imagens de Landsat 8.

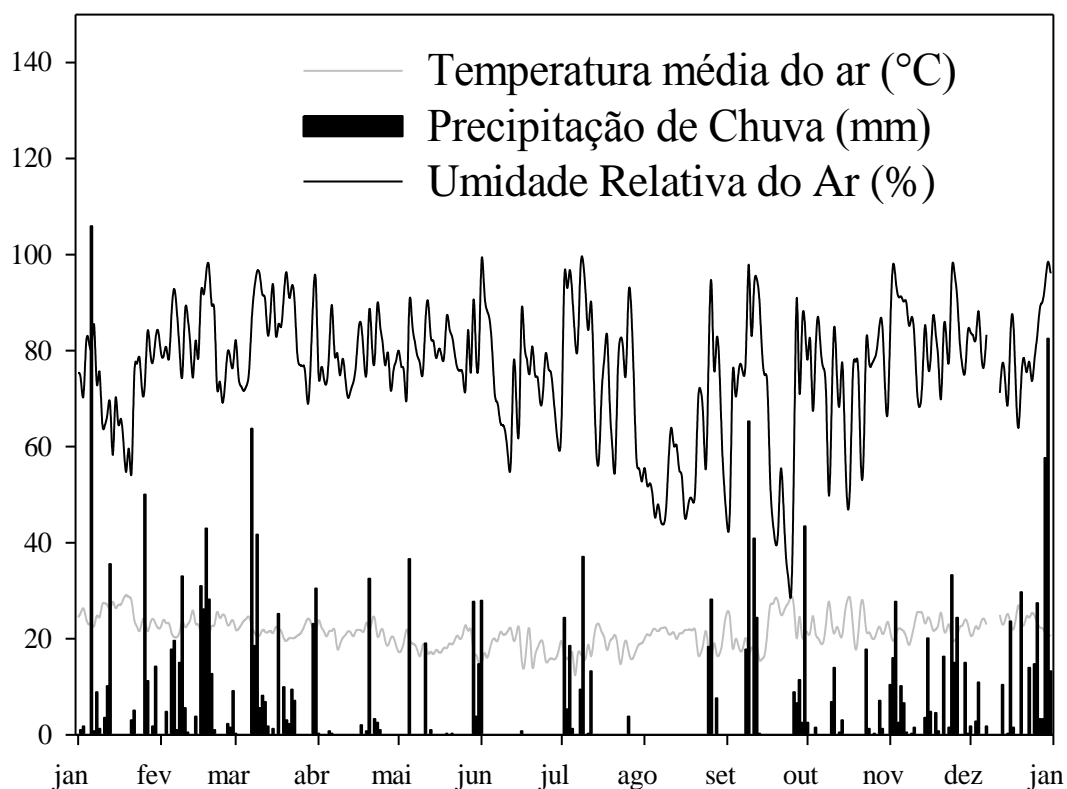


Figura 4. Dados meteorológicos diários da região com cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da Fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.

5.3 Metodologia

5.3.1 Penman-Monteith

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), os dados meteorológicos necessários conforme modelo proposto pela FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Foram obtidos da estação meteorológica automática, no Departamento de Solos e Recursos Ambientais, pertencente a UNESP- Campus Botucatu – SP.

A ET_o foi obtida pela Equação 1.

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (1)$$

Sendo: **ET_o** - Evapotranspiração de referência (mm/dia); **R_n** - radiação líquida total diária (MJ/m²); **G** - fluxo de calor no solo (MJ/m²); **γ** - constante psicrométrica (0,063 kPa/°C); **T** - temperatura do ar (°C); **U₂** - velocidade do vento a 2 metros de altura (m/s); **e_s** - pressão de saturação do vapor (kPa); **e_a** - pressão real do vapor (kPa); **s** - declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar (kPa/°C).

5.3.2 Algoritmo de Balanço de Energia na Superfície (SEBAL)

O modelo descrito tem por finalidade o mapeamento da ETo obtido após a aplicação do algoritmo de balanço de energia na superfície (SEBAL), que possibilita por meio do sensoriamento remoto chegar a evapotranspiração (mm/hora) da área em estudo, conforme o fluxograma descrito na Figura 5.

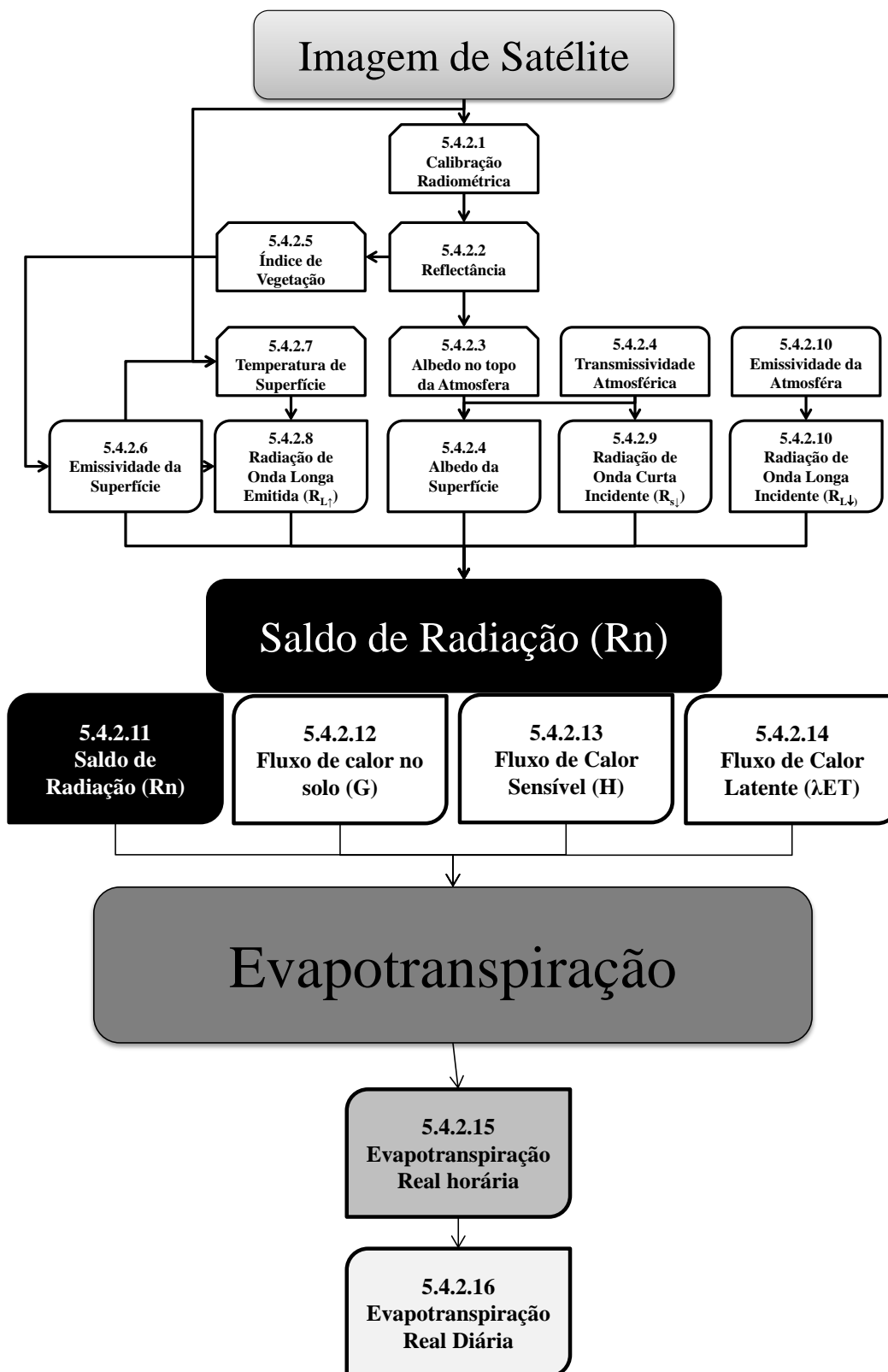


Figura 5. Fluxograma das etapas do processamento para obtenção Evapotranspiração Horária, a partir do SEBAL.

O balanço de energia na superfície foi estimado, após realização de processamento de dados obtidos em imagem de satélite, deste modo, o SEBAL apresenta a seguintes etapas:

5.3.2.1 Calibração Radiométrica

No cálculo e calibração da radiância espectral de cada banda $L_{\lambda i}$, utiliza-se-á a Equação 2, proposta por Chander e Markhan (2003).

$$L_{\lambda i} = a + bi * ND \quad (2)$$

Sendo: $L_{\lambda i}$ - Radiância espectral de cada banda ($Wm^{-2} st^{-1}\mu m^{-1}$); \mathbf{a} - o coeficiente de calibração (radiância mínima) de cada banda ($Wm^{-2} st^{-1}\mu m^{-1}$); \mathbf{b} - o coeficiente de calibração (radiância máxima) de cada banda ($Wm^{-2} st^{-1}\mu m^{-1}$); \mathbf{i} - são as bandas (1,2, 3,4,5,6,7,10 e 11) do Landsat 8; \mathbf{ND} - número digital de cada pixel na imagem.

5.3.2.2 Reflectância

O cálculo da reflectância monocromática de cada banda $\rho_{\lambda i}$, foi definida de acordo com ALLEN et al. (2002), pela Equação.

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi * L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} * \cos Z * d_r} \quad (3)$$

Sendo: $L_{\lambda i}$ - a radiância espectral de cada banda; $k_{\lambda i}$ - a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$); Z - o ângulo zenital solar; d_r - o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em dado dia do ano (TASUMI, 2003) obtendo -se pela Equação 4.

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(DJ \frac{2\pi}{365} \right) \quad (4)$$

Onde: DJ–Dia Juliano do ano das imagens de satélite (d_r e $\cos Z$).

5.3.2.3 Albedo no Topo da Atmosfera

O cálculo do albedo planetário α_{toa} , foi obtido pela combinação linear (Equação 5) das reflectâncias monocromáticas dos canais reflectivos do TM – Landsat 8, adaptando ao encontrado por Teixeira et al. (2015).

$$\alpha_{toa} = 0,10\rho_1 + 0,31\rho_2 + 0,30\rho_3 + 0,13\rho_4 + 0,08\rho_5 + 0,05\rho_6 + 0,04\rho_7 \quad (5)$$

Sendo: ρ_2 ; ρ_3 ; ρ_4 ; ρ_5 ; ρ_6 e ρ_7 - as refletâncias monocromáticas das bandas 2; 3; 4; 5; 6 e 7, respectivamente.

5.3.2.4 Albedo da Superfície

O albedo, corrigido para os efeitos atmosféricos (α), foi obtido pela Equação 6, de SILVA et al. (2005).

$$\alpha = 0,7192 \times \alpha_{toa} + 0,0947 \quad (6)$$

Sendo: α_{toa} - albedo no topo da atmosfera.

A transmissividade atmosférica (τ_{sw}) é calculado conforme NICÁCIO (2008), descrita na equação 7.

$$\tau_{sw} = \frac{RG}{RS_{topo}} \quad (7)$$

Onde: RG – radiação global; RS_{topo} – radiação no topo da atmosfera.

5.3.2.5 Índices de Vegetação (NDVI, SAVI e IAF)

O Índice da Diferença Normalizada de Vegetação (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) é um indicador sensível da quantidade e condição da

vegetação verde variando de -1 a $+1$. O Allen et al. (2002), obtém-se os valores a partir da Equação 8.

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \quad (8)$$

Sendo: ρ_5 , ρ_4 correspondem as reflectâncias das bandas 5 e 4 do sensor TM Landsat 8.

5.3.2.6 Emissividades

De acordo com Allen et al. (2002), as emissividades ϵ_{NB} (energia irradiada por um objeto) e ϵ_0 (energia irradiada por um corpo negro à mesma temperatura) serão obtidas, para $\text{NDVI} > 0$ e $\text{IAF} < 3$, segundo a Equação 10.

$$\epsilon_{\text{NB}} = 0.9418 \times -\ln \tau_{\text{sw}}^{0.1027} \quad (10)$$

$$\epsilon_{01} = (\text{NDVI} \leq 0.15) \text{ and } (\text{NDVI} > 0), 0.92, (1.0035 + 0.0589 * \ln(\text{NDVI}))$$

$$\epsilon_{02} = (\text{NDVI} < 0,1, \epsilon_{01}) \quad (11)$$

5.3.2.7 Temperatura da Superfície

A temperatura da superfície (T_s) será obtida por meio da Equação 12 ($^{\circ}\text{K}$).

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{\text{NB}} * K_1}{L_{\lambda i}} + 1\right)} \quad (12)$$

Onde: $L_{\lambda i}$ = Banda Termal; ϵ_{NB} = emissividade; $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1260,56 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ são as constantes descritas por ALLEN et al. (2002), e foram utilizadas do Landsat 8.

5.3.2.8 Radiação de Onda Longa Emitida ($R_{L\uparrow}$)

A radiação de onda longa emitida pela superfície $R_{L\uparrow}(\text{W m}^{-2})$ foi obtida pela equação de Stefan-Boltzmann pela Equação 13.

$$\mathbf{R}_{L\uparrow} = \varepsilon_0 * \sigma * T_s^4 \quad (13)$$

Onde: ε_0 é a emissividade de cada pixel; σ a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$); T_s é a temperatura da superfície (K).

5.3.2.9 Radiação de Onda Curta Incidente ($\mathbf{R}_{s\downarrow}$)

A Radiação de Onda Curta Incidente ($\mathbf{R}_{s\downarrow}$) foi obtida, de acordo com Allen et al. (2002), pela Equação 14.

$$\mathbf{R}_{s\downarrow} = S * \cos Z * d_r * \tau_{sw} \quad (14)$$

Onde: $\mathbf{R}_{s\downarrow}$ - radiação de onda curta incidente (Wm^{-2}); S - constante solar (1367 W m^{-2}); Z - ângulo zenital solar; d_r - inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol; τ_{sw} - transmissividade atmosférica, obtida com modelo digital de elevação do SRTM.

5.3.2.10 Radiação de Onda Longa Incidente ($\mathbf{R}_{L\downarrow}$)

A Radiação de Onda Longa Incidente ($\mathbf{R}_{L\downarrow}$) foi obtida pela Equação 15 proposta por Stefan-Boltzman.

$$\mathbf{R}_{L\downarrow} = \varepsilon_0 * \sigma * T_s^4 \quad (15)$$

Sendo: ε_0 - emissividade atmosférica ($\varepsilon_0 = 0,85(-\ln(\tau_{sw}))^{0,09}$); σ - constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$); T_a (K) - temperatura da superfície no pixel frio, conforme Allen et al. (2002) e Tasumi (2003).

5.3.2.11 Saldo de Radiação (Rn)

O saldo de radiação à superfície foi obtido utilizando a Equação 16 de ALLEN et al. (2002).

$$\mathbf{R}_n = (1 - \alpha) * R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) * R_{L\downarrow} \quad (16)$$

Sendo: $\mathbf{R}_{s\downarrow}$ - radiação de onda curta incidente; α - albedo corrigido de cada pixel; $\mathbf{R}_{L\downarrow}$ - radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel, $\mathbf{R}_{L\uparrow}$ - radiação de onda longa emitida por cada pixel; ϵ_0 - emissividade de cada pixel.

5.3.2.12 Fluxo de calor no solo (G)

O Fluxo de calor no solo (G) foi obtido segundo Bastiaanssen (2000) a partir da Equação 17.

$$\mathbf{G} = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038 * \alpha^2) * (1 - 0,98 * NDVI^4) \right] R_n \quad (17)$$

Sendo: T_s - temperatura da superfície (°C); α - albedo corrigido do pixel; $NDVI$ - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; \mathbf{R}_n - Saldo de Radiação.

5.3.2.13 Fluxo de Calor Sensível (H)

A estimativa de H dar-se (Figura 6), foi obtido de acordo com BASTIAANSSEN et al. (1998) e ALLEN et al. (2002), pela Equação 18.

$$\mathbf{H} = \frac{\rho * c_p * dT}{r_{ah}} \quad (18)$$

Sendo: ρ - densidade do ar úmido ($1,15 \text{ kgm}^{-3}$); c_p - calor específico do ar à pressão constante ($1005 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), dT - gradiente da diferença de temperatura próximo à superfície (°K); r_{ah} - resistência aerodinâmica ao transporte de calor (sm^{-1}).

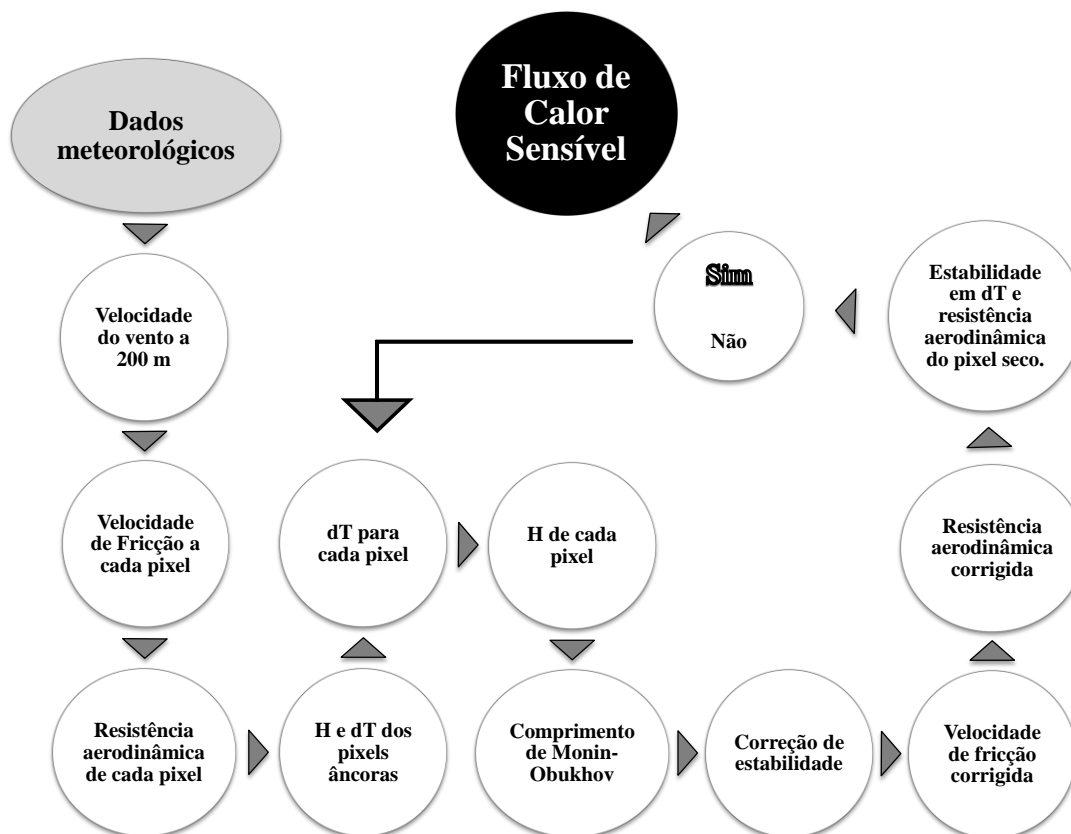


Figura 6. Fluxograma das etapas do processamento para estimativa do Fluxo de Calor Sensível (H), a partir do algoritmo de balanço de energia na superfície - SEBAL.

Allen et al. (2002) sugeriram o cálculo do coeficiente de rugosidade (z_{om}), devido a irregularidade e rugosidade da superfície, onde o valor pode variar conforme a altura média da vegetação (h) na estação meteorológica (Equação 19).

$$z_{om} = \exp(0.2636 * (NDVI/Alb_{sur}) - 2.2087)$$

$$z_{om} = ((NDVI \leq 0), 0.0005, z_{0m1}) \quad (19)$$

Sendo: h - altura da vegetação na estação meteorológica.

Velocidade de fricção u^* (ms⁻¹) será calculada pelo perfil logarítmico do vento para a condição de estabilidade neutra (BASTIAANSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2002), pela Equação 20.

$$u_* = \frac{k * U_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{om}}\right)} \quad (20)$$

Sendo: k - constante de Von Karman (0,41); u_x - velocidade do vento (ms-1) medida na estação meteorológica; z_x - altura em que foi tomado o valor da velocidade do vento; z_{om} - coeficiente de rugosidade local.

A estimativa da velocidade do vento a 100 m ($u_{100}=m^*s^{-1}$) será obtida pela Equação 21.

$$u_{100} = u_* \frac{\ln\left(\frac{100}{z_{om}}\right)}{K} \quad (21)$$

Onde: u^* - velocidade de fricção na estação meteorológica (m^*s^{-1}); z_{om} - comprimento da rugosidade no pixel da estação meteorológica.

Considera-se que u_{100} é constante para toda a imagem, a partir daí calcula-se, então, a velocidade de fricção para todos os pixels, por meio da Equação 22.

$$u_* = \frac{k \cdot u_{100}}{\ln\left(\frac{100}{z_{om}}\right)} \quad (22)$$

Onde: z_{om} em cada pixel é obtido em função do NDVI, segundo a equação (BASTIAANSEN, 2000).

$$z_{om} = \exp(-5,809 * SAVI) \quad (23)$$

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} (s^*m^{-1}), considerando a estabilidade neutra da atmosfera, será computada pela Equação 24.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{k \cdot u_*} \quad (24)$$

Onde: z_1 e z_2 – alturas (m) acima da superfície (BEZERRA et al., 2008).

A diferença de temperatura próxima à superfície dT ($^{\circ}C$) foi estimada pela Equação 25 para cada pixel.

$$dT = a + bT_s \quad (25)$$

Onde: os coeficientes a e b são obtidos através dos pixels-âncora (quente e frio).

O pixel frio foi usado para definir a quantidade de evapotranspiração ocorrente em área bem irrigada e completamente vegetada, onde toda a energia disponível é usada para evaporação ou evapotranspiração da água, então $H_{\text{frio}} = 0$ para o pixel frio (BASTIAANSEN, 2002), considerado pela Equação 26.

$$\lambda ET_{\text{frio}} = R_n - G \quad (26)$$

O pixel quente será localizado em uma área seca (Equação 27), áreas já colhidas ou em preparo agrícola, onde o fluxo de calor latente é nulo $\lambda ET = 0$ e o fluxo de calor sensível H_{quente} (W m^{-2}).

$$H_{\text{quente}} = R_n - G = \frac{\rho * c_p * (a + b T_s)}{r_{\text{ah}}} \quad (27)$$

Sendo: ρ – massa específica do ar úmido ($1,15 \text{ kg m}^{-3}$); c_p - calor específico do ar ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); a, b - constantes de calibração da diferença de temperatura; T_s - temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$); r_{ah} - resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível (s m^{-1}).

Para identificar a condição de estabilidade da atmosfera, dar-se-á pela obtenção do comprimento Monin-Obukhov (L) em metros pela Equação 28.

$$L = - \frac{\rho * c_p * u_*^3 * T_s}{g * k * H} \quad (28)$$

Onde: ρ - massa específica do ar úmido ($1,15 \text{ kg m}^{-3}$); c_p - calor específico do ar ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); u_* - velocidade de fricção de cada pixel da imagem (m s^{-1}); T_s - temperatura da superfície em Kelvin; g - constante gravitacional ($9,81 \text{ m s}^{-2}$); H - fluxo de calor sensível (W m^{-2}). Os valores de L definem as condições de estabilidade atmosférica, sendo: **I** – se $L < 0 \rightarrow$ Atmosfera instável; **II** – se $L > 0 \rightarrow$ Atmosfera estável; **III** – se $L = 0 \rightarrow$ Atmosfera neutra.

O comportamento da estabilidade da atmosfera poderá indicar a necessidade de se calcularem os coeficientes de correção da estabilidade atmosférica para o transporte de calor e momentum, que são ψ_m e ψ_h , respectivamente, representado pelas Equações 29 a 37 (BASTIAANSEN, 1995; MORSE et al., 2000; ALLEN et al., 2002).

I – Se $L < 0$:

$$\mathbf{X}_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \frac{0,1}{L}\right)^{0,25} \quad (29)$$

$$\mathbf{X}_{(2m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L}\right)^{0,25} \quad (30)$$

$$\mathbf{X}_{(100m)} = \left(1 - 16 \frac{100}{L}\right)^{0,25} \quad (31)$$

$$\Psi_{h(0,1)} = 2 * \ln \left(\frac{1+x_{(0,1m)}^2}{2} \right) \quad (32)$$

$$\Psi_{h(2)} = 2 * \ln \left(\frac{1+x_{(2m)}^2}{2} \right) \quad (33)$$

$$\Psi_{m(100m)} = 2 \ln * \left(\frac{1+x_{(100m)}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x_{(100m)}^2}{2} \right) - 2 \arctg(x_{(100m)}) + 0,5\pi \quad (34)$$

II – Se $L > 0$:

$$\Psi_{h(0,1m)} = -5 \left(\frac{0,1}{L} \right) \quad (35)$$

$$\Psi_{h(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \quad (36)$$

$$\Psi_{m(100m)} = -5 \left(\frac{100}{L} \right) \quad (37)$$

III – Se $L=0$: $\Psi_m = 0$ e $\Psi_h=0$

Após esse procedimento, obtém-se o valor da velocidade de fricção corrigida pela seguinte Equação 38.

$$\mathbf{u}_* = \frac{k * \mathbf{u}_{100}}{\ln \left(\frac{100}{z_{0m}} \right) - \Psi_{m(100m)}} \quad (38)$$

Sendo: \mathbf{u}_{100} - velocidade do vento a 100 m ($m^* s^{-1}$); \mathbf{k} - constante de Von Karman; z_{0m} - coeficiente de rugosidade de cada pixel (m); $\Psi_{m(100m)}$ - correção da estabilidade para o transporte de momentum a 100 m.

De posse dos valores corrigidos de \mathbf{u}^* , será computado o valor corrigido da resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} ($s^* m^{-1}$) por meio da Equação 39 (ALLEN et al., 2002; BASTIAANSEN, 1995; BEZERRA, 2006; MEIRELLES, 2007; MORSE et al., 2000).

$$\mathbf{u}_* = \frac{\ln \frac{z_2}{z_1} - \Psi_h(z_2) + \Psi_h(z_1)}{k * \mathbf{u}_*} \quad (39)$$

5.3.2.14 Fluxo de Calor Latente (λ_{ET})

O fluxo de calor latente foi estimado como um termo residual do balanço de energia, conforme expressada pela Equação 40.

$$\lambda_{ET} = R_n - H - G \quad (40)$$

Onde: λ_{ET} - fluxo de calor latente ($W \cdot m^{-2}$); R_n - saldo de radiação à superfície ($W \cdot m^{-2}$); G - fluxo de calor no solo ($W \cdot m^{-2}$); H - fluxo de calor sensível ($W \cdot m^{-2}$).

5.3.2.15 Evapotranspiração real horária

O fluxo de calor latente pode ser facilmente convertido em evapotranspiração real horária – E_{Th} (mm), integrando ao longo de uma hora, pela Equação 41 (TASUMI, 2003; ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007; NICÁCIO, 2008).

$$E_{Th} = 3600 \cdot \lambda_{ET} / \lambda \quad (41)$$

Sendo: λ_{ET} - fluxo de calor latente ($W \cdot m^{-2}$); λ - calor latente de vaporização da água ($J \cdot kg^{-1}$).

A energia necessária para evaporar uma unidade de massa de água, dado pela equação (HARRISON, 1963).

$$\lambda = [2,501 - 0,00236 * (T_s - 273,16)] * 10^6 \quad (42)$$

Sendo: T_s a temperatura da superfície ($^{\circ} K$).

5.3.2.16 Evapotranspiração real diária

Após o cálculo da evapotranspiração horária, é possível a obtenção da evapotranspiração real diária pela Equação 43.

$$\Gamma = \frac{\lambda ET}{R_n - G} \quad (43)$$

Sendo: Γ - fração evaporativa (0 a 1) no instante da passagem do satélite.

Para estimativa da evapotranspiração diária ($\text{mm}^* \text{d}^{-1}$) foi utilizada a Equação 44 conforme Bastiaanssen (2000).

$$ET_{\text{diária}} = 86400 * \frac{\Gamma * Rn_{\text{diária}}}{\lambda} \quad (44)$$

Sendo: $ET_{\text{diário}}$ - evapotranspiração real diária em cada pixel ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$); Γ - fração evaporativa no instante da passagem do satélite; $Rn_{\text{diário}}$ - saldo de radiação ($\text{W}^* \text{m}^{-2}$) integrado em 24 horas (Equação 45); λ - calor latente de vaporização ($\text{J}^* \text{kg}^{-1}$).

$$Rn_{\text{diário}} = (1 - \alpha_o) * Rc_{24h} - 110 * \tau d \quad (45)$$

Onde: α_o - albedo da superfície; Rc_{24h} - média da radiância de ondas curtas incidentes à superfície; τd - transmitância atmosférica; $Rn_{\text{diário}}$ - saldo de radiação ($\text{W}^* \text{m}^{-2}$).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Albedo de Superfície (α_0)

O cálculo do albedo da superfície é necessário para corrigir a variação das características físico-químicas da superfície estudada e, conseqüentemente, o ângulo zenital de cada pixel da imagem, de acordo com uso do solo. Deste modo, realizaram-se seis análises de albedo, visando observar o comportamento nas imagens disponíveis do Landsat 8, abrangendo diferentes estágios do desenvolvimento da Cana-de-Açúcar.

Analisando os valores encontrados nas imagens de dias julianos (DJ) 129, 145, 161, 177, 209 e 225, como pode-se observar na Figura 7, o albedo tem valores mínimos de 0,11 e máximo de 0,22 nas áreas cultivadas com Cana-de-Açúcar.

Os valores encontrados no presente trabalho, são coerentes quando comparado a Dantas (2013), que utilizando o algoritmo para mapeamento da evapotranspiração da sub-bacia hidrográfica do Riacho Jardim, no estado do Ceará, encontrou valores de albedo (0,10 a 0,15) utilizando imagens de Landsat 5 em estudo temporal, onde no ano de 2011 a abrangência de áreas agrícolas era de 27,98 km².

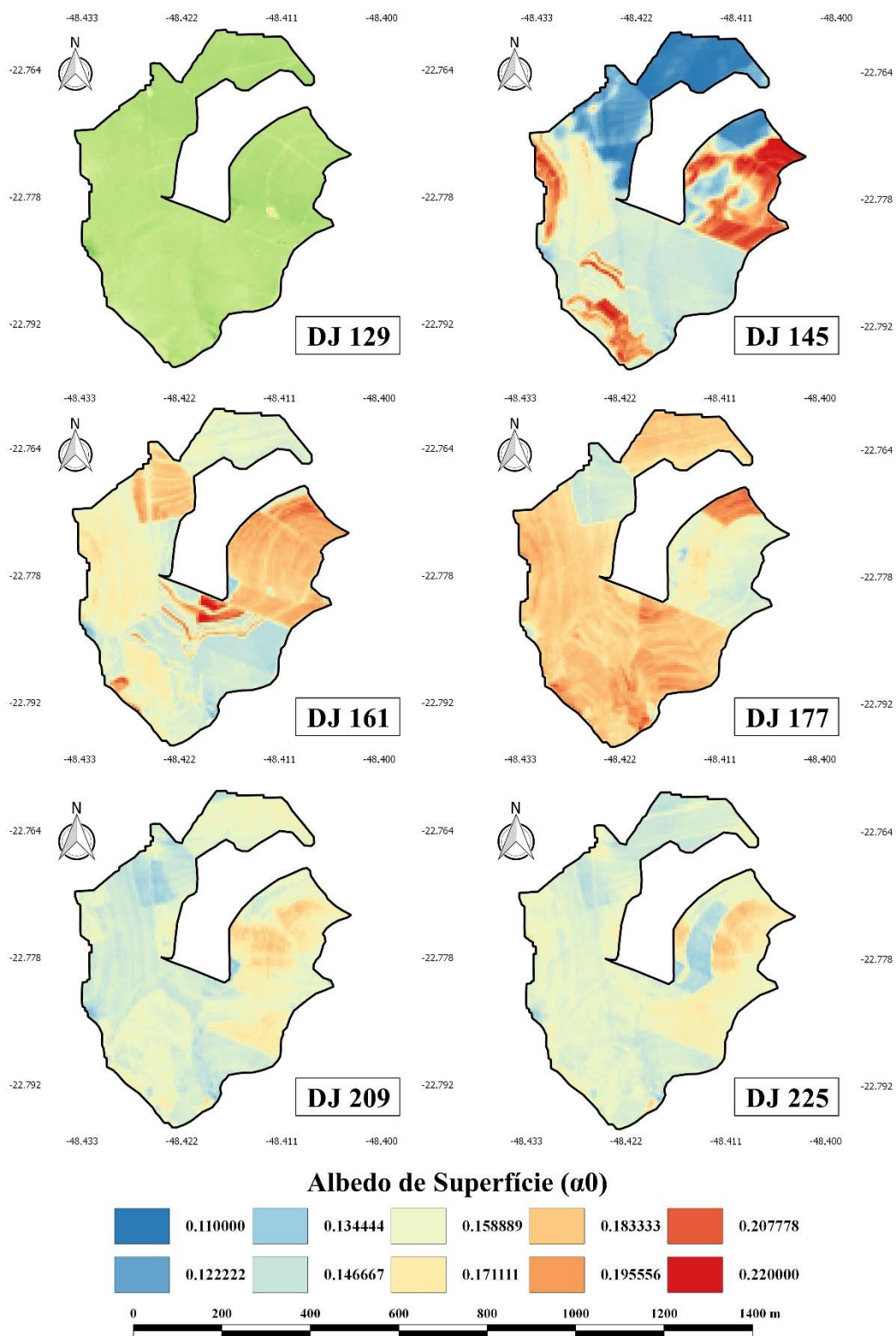


Figura 7. Mapas de albedo da superfície (α_0) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da Fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.

Azevedo et al. (2014) descreveram na computação da disponibilidade energética em tabuleiros costeiros do estado da Paraíba, valores de albedo inversamente proporcional ao crescimento e desenvolvimento da *Saccharum spp.* (RB92579), desse modo, obtiveram valores de 0,23 (crescimento dos colmos) a 0,21 (maturação), tendo valores médios de 0,23. No entanto, André et al. (2010) avaliaram aspectos energéticos no desenvolvimento da Cana-de-Açúcar e obtiveram valores no ciclo da cultura de $0,28 \pm 0,029$, entretanto, destacaram o crescimento do albedo de forma proporcional ao aumento do IAF da cultura, sendo valor médio de 0,24 no perfilhamento, de 0,27 a 0,30 crescimento dos colmos e 0,31 na maturação dos colmos, deste modo, o variação dos valores de albedo, demonstram que as imagens de Landsat 8 usadas no estudo, captam comportamento fisiológicos nas diferentes etapas de crescimento da planta.

Assim, o albedo mapeado na Figura 7, aponta comportamento como descrito por Andrade (2008) que, aplicando o SEBAL para evapotranspiração e biomassa da Cana-de-Açúcar, produzida na fazenda Boa Fé no município de Conquista – MG, encontrou valores de 0,05 a 0,59, variando entre solo exposto e telhado de galpão, respectivamente. Também Giongo et al. (2010a), a partir de imagens Landsat 5, em área de cana-de-açúcar na região de Santa Rita do Passa Quatro – SP, observaram valores entre 0,13 a 0,23 e, mesmo em diferente metodologia, os valores de albedo calculados nas imagens Landsat 5 por modelo numérico do terreno, em áreas agricultáveis com culturas de Cana-de-Açúcar, ficaram entre 0,13 a 0,25 (GIONGO; VETTORAZZI, 2014).

Pesquisa sobre os efeitos dos métodos de colheita de Cana-de-Açúcar na Flórida e Costa Rica, realizado por Sandhu et al. (2013) descrevem valores de albedo indo de 0,22 no mês de março para 0,12 no mês de maio, assim mostrando que a Cana-de-Açúcar em diferentes regiões apresenta valores próximos, como observado por Teixeira et al. (2009), calibrando os parâmetros de entrada no SEBAL para avaliar a evapotranspiração e a produtividade de água, encontraram valores de albedo (0,12 a 0,18) em áreas de agricultura irrigada e de vegetação nativa na bacia do Rio São Francisco do Baixo-Médio – PE, compatíveis com o descrito neste trabalho.

6.2 Índice da Diferença de Vegetação Normalizada (NDVI)

Os mapas espaciais do NDVI nos diferentes dias juliano no cultivo da Cana-de-Açúcar, tem intuito de indicar a redução de biomassa, expressando diretamente o desempenho fisiológico da cultura. Assim, os mapeamentos do NDVI em áreas de cultivo apresentam valores decrescente ao longo do tempo, tornando-se indicativo da redução de taxas evapotranspirativas. Deste modo, ao longo do ciclo, os valores oscilaram conforme o desenvolvimento da planta, como pode-se observar na Figura 8, entre 0,15 e 0,90, onde o mínimo está no DJ 209 e o máximo no DJ 129, respectivamente, apontando uma perda de área foliar devido à ausência de biomassa decorrente da colheita.

O NDVI tornou-se indicativo para diferentes épocas de plantio, tamanho e densidade da Cana-de-Açúcar, devido seus valores variarem ao longo do tempo nas imagens de Landsat 8. Assim, pode-se comparar com os índices NDVI encontrados no mapeamento de áreas com expansão da irrigação por pivô central, localizada nas proximidades do município de Paranapanema – SP, cujo Santos et al. (2015) obtiveram para solo exposto de 0,31 a 0,44; para cultivos irrigados de 0,91 a 0,95; cultivos sem irrigação de 0,89 a 0,92 e pastagem de 0,61 a 0,73. Mesmo com culturas com diferentes sistemas fisiológicos, densidade vegetativa, localização e tipo de solo, os valores de NDVI encontrados foram semelhantes ao obtidos na presente pesquisa.

Leda et al. (2016) estudaram indicadores da qualidade ambiental da vegetação, caracterizada por diferentes índices na bacia do Ribeirão Prata, Lençóis Paulista – SP, encontrando NDVI de -0,23 a 0,74, correspondentes a diferentes cobertura da superfície, variando de acordo com a umidade no solo em diferentes períodos do ano. Assim, como descrito por Santos et al. (2015), valores negativos de NDVI representam superfícies livres (rios, lagos). Na região da Chapada do Araripe, foram encontrados oscilação de NDVI de 0,56 a 1,00 na reserva florestal, devido à densidade das árvores, destacando valores médios de 0,51 a 0,65 em grande parte da sub-bacia (DANTAS, 2013).

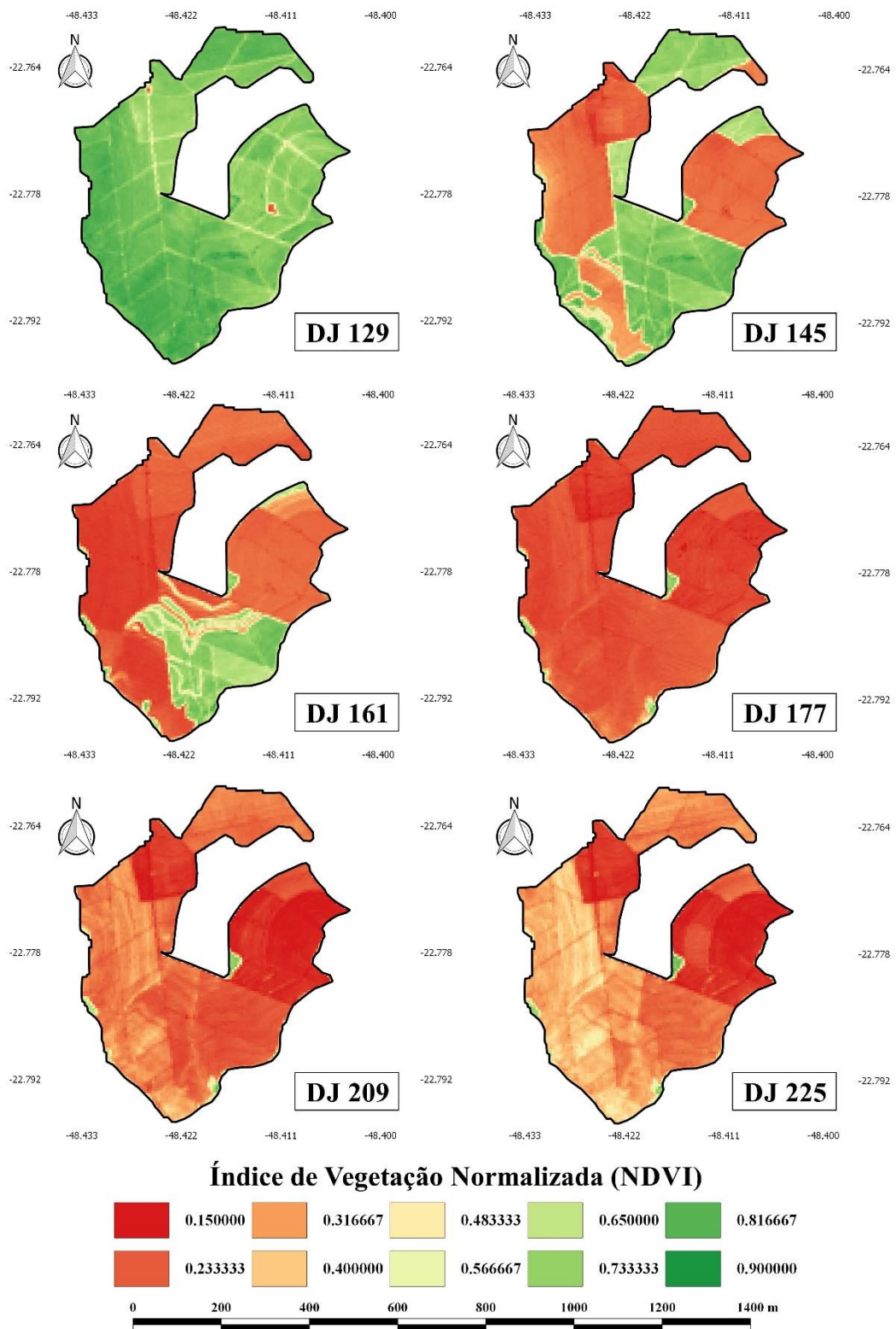


Figura 8. Índice da Diferença de Vegetação Normalizada (NDVI) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.

Os valores de NDVI obtidos também foram coerentes com os descrito por Fausto et al. (2016) que encontraram valores de 0,15 a 0,75, destacando que mata ciliar tem valores percentuais maiores quando comparado ao cultivo de soja (57%), Cana-de-Açúcar (35%) e de pastagem de (40%), sendo os valores negativos nos corpos d'água, assim, diagnosticando o impacto da alteração do uso do solo nos índices biofísico

Outro trabalho que corrobora os valores obtidos de NDVI foi o de Andrade (2008) que contabilizaram a variação do NDVI de -1,0 a 0,87, sendo 0,445 o NDVI médio um indicativo de plantio perene no período de avaliação da estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da Cana-de-Açúcar, entre os anos de 2004 a 2007 no município de Miguelópolis-SP. Lira (2008) também apontaram, no mapa temático de NDVI, valor médio de 0,65 para Cana-de-Açúcar, comprovando que, para os valores de DJ 129, 145 e 161, apresentam coerência e correlação com a densidade e estágio fisiológico em que a cultura se encontrava.

Valores médios obtidos na Figura 8, encontram-se dentro do proposto por Delgado et al. (2012) que descrevem o NDVI máximo de 0,81, em cultivo de Cana-de-Açúcar, localizada no triângulo mineiro, assim como na variabilidade dos valores de NDVI em diferentes estádios fenológicos ao longo do tempo. Fernandes et al. (2011), pelo alto nível de precisão dos valores de NDVI, propuseram este como bom indicador para monitoramento e produção de boletins mensais de monitoramento das culturas para várias regiões do mundo.

Estes dados encontrados poderão, com ajustes de campo, ser um ponto de partida para análise da demanda hídrica como proposto por este trabalho. Com os valores da Figura 8 tem-se a possibilidade de apontar descrição do tipo de solo, como proposto por Zanzarini et al. (2013), onde descrevem em seu trabalho amplitude de valores 0,21 a 0,49, com desvio padrão 0,05, indicando onde, provavelmente, sofreram variações correlacionadas com atributos do solo.

6.3 Temperatura da Superfície (T_s)

A temperatura da superfície (T_s) é um dos principais dados oriundos da banda termal, deste modo, mapeando o T_s na área de produção de Cana-de-Açúcar como pode-se observar na Figura 9, valores oscilantes em torno de 20 °C, que estão dentro dos valores observados, como descrito por ANDRADE (2008) que encontrou valores médios, ao longo dos anos de 2004 a 2007, foi de 297,86 K ou 24,7°C, aplicando o SEBAL para evapotranspiração e biomassa da Cana-de-Açúcar, produzida na fazenda Boa Fé no município de Conquista – MG.

Na mesma Figura 9 observa-se variação entre 15 e 25 °C, onde os maiores valores são decorrentes da redução de biomassa da Cana-de-Açúcar devido a colheita, visualizada no DJ 145, com maiores valores de T_s nos DJ 161, consequência de maior solo exposto e da temperatura ambiente que neste dia apresentaram máximas entre 26,09 a 26,19°C.

A densidade da vegetação está diretamente ligada a superfície estudada, como SILVA et al. (2015a) descreveram o comportamento do mapeamento da temperatura de superfície, justificaram a variação dos valores obtidos de acordo com o uso do solo, onde variações menores valores da T_s , são menores em solo coberto por vegetação de acordo com a quantidade da biomassa, justificando, assim, a variação nos diferentes dias de imagem da Figura 9.

Gomes et al. (2013) reportaram valores de T_s entre 19,85 a 33,85°C, os maiores valores nas regiões zoneadas com presença de áreas com solo exposto, justificando assim as manchas de maior temperatura no presente trabalho. Sendo as áreas com tonalidade alaranjadas na predominância de solo exposto e as amareladas com uma menor biomassa, refletindo diretamente na temperatura resultante da banda termal do Landsat 8, como explicado por Tartari et al. (2015), que nas manchas claras de seu mapeamento usando produto da banda termal do Landsat 5, os maiores valores de temperaturas são para áreas desmatadas (solos expostos), assim como os valores do dia 10 de junho (DJ 161) do presente trabalho.

Zhou et al. (2014), avaliando a estimativa da transpiração das plantas, a partir de dados de temperatura, obtidos pelo modelo de três temperaturas e o uso

do SEBAL, chegaram à conclusão que o comportamento da T_s em solo exposto e, principalmente seco, ocasiona, um maior erro na estimativa da evapotranspiração, assim apontando a importância do mapeamento da temperatura da superfície, como observado na Figura 9.

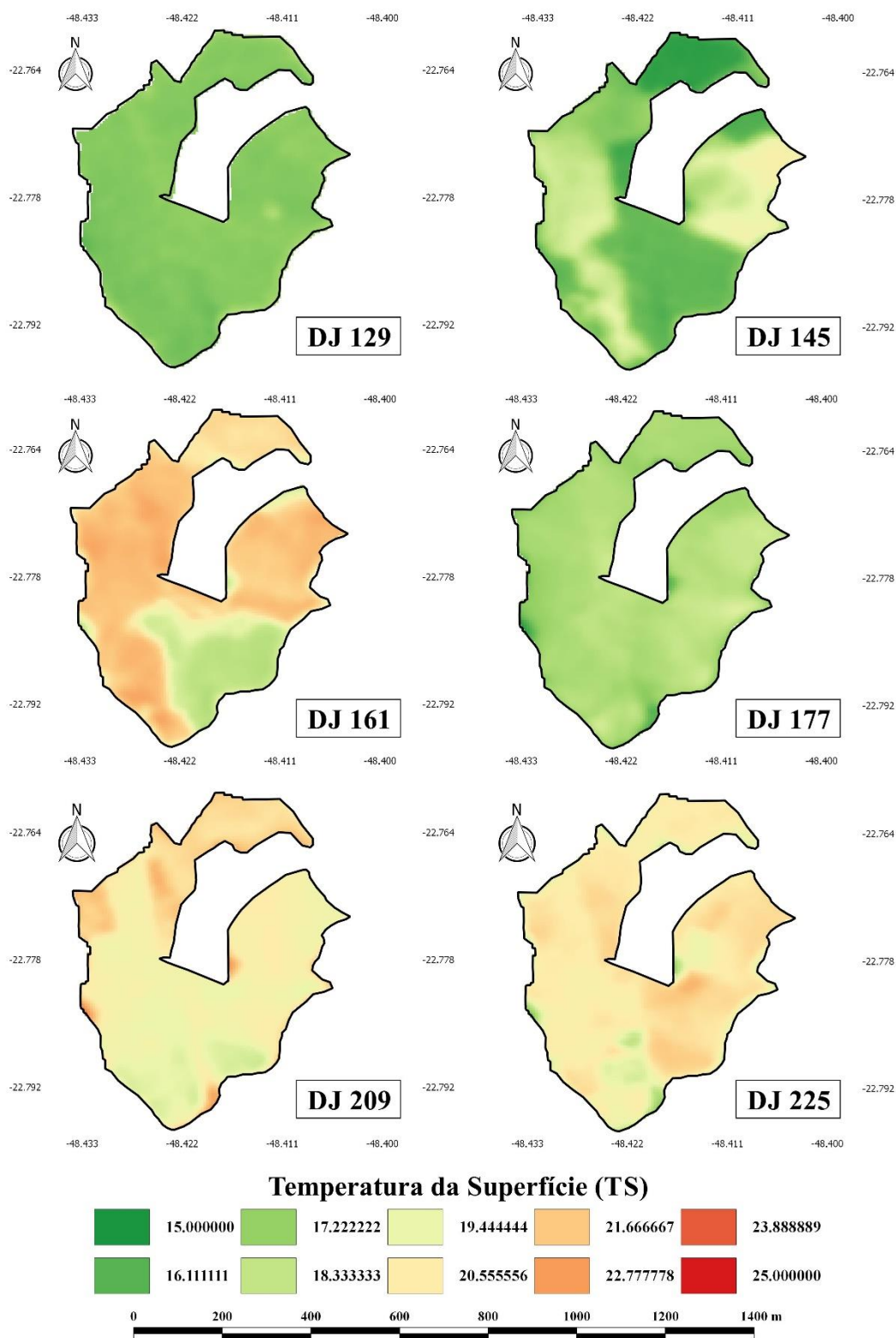


Figura 9. Mapa de Temperatura da Superfície (Ts) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.

6.4 Saldo de Radiação (Rn)

Os valores de saldo de radiação na Figura 10, descreveram diferentes variações espaciais, correspondentes aos diferentes valores obtidos no horário solar de 10:00 h, permitindo o mapeamento observação do Rn, a partir de um produto do satélite Landsat 8, com valor médio de 345 W.m^{-2} para os diferentes DJ.

A variação dos valores entre 280 a 370 W.m^{-2} , enquadram-se dentro dos padrões do mapeamento de estimativa de saldo de radiação para a Cana-de-Açúcar, como descreveram GIONGO et al. (2010b), em área de produção de Cana-de-Açúcar, utilizando imagens do Landsat, com validação dos dados de campo por estações, em Santa Rita do Passa Quatro – SP, encontrando valores de $234,8$ a $859,2 \text{ W.m}^{-2}$, com ao auxílio do algoritmo SEBAL, assim, foi encontrado coeficiente de correlação de $0,994$ com a estação micrometeorológica.

Lira (2008) obtiveram valores de $306,8$ a $913,7 \text{ W.m}^{-2}$ no processamento de imagens para obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspirativos da Cana-de-Açúcar, região semi-árida do Nordeste brasileiro. Mesmo com valores de Rn da Figura 10, dentro dos encontrados no mapeamento de Lira (2008), onde o mesmo quantifica saldos em W.m^{-2} , de certo modo os valores maiores proposto neste trabalho são devidos a diferentes localizações geográficas.

Machado et al. (2014) descreveram Rn com três imagens de Landsat 5 em anos diferentes, em região canavieira na zona da mata sul de Pernambuco, validaram com estações meteorológicas o saldo de radiação para Cana-de-Açúcar, com mapas de Rn variando de 600 a 680 W.m^{-2} , destacando, que os maiores valores estão na imagem de janeiro de 2011. Devido a sazonalidade da radiação solar e as diferenças climáticas da região de estudo, os autores apontaram valores superiores ao dia 09 de maio (DJ 129) da Figura 10, onde a Cana-de-Açúcar apresentou maior biomassa, consequentemente, interfere diretamente no saldo de radiação como afirmaram Silva et al. (2015a), estudando diferentes cobertura de solo, e comparando as diferentes densidades com as observadas no presente trabalho com os resultados de GOMES et al. (2013).

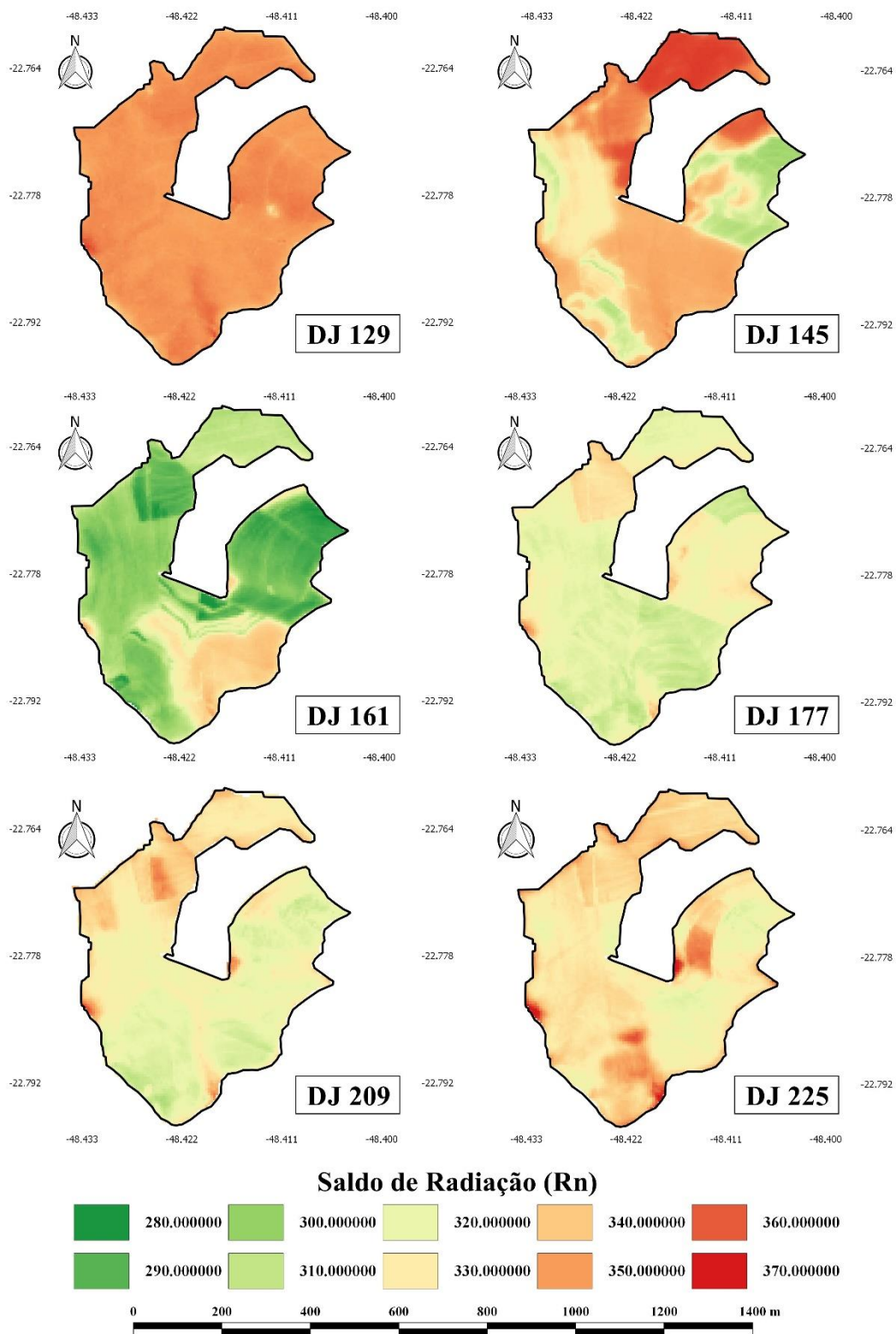


Figura 10. Mapas do Saldo de Radiação (Rn) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.

ANDRADE (2008), avaliando a perda de água pela planta com o acúmulo de biomassa pela Cana-de-Açúcar, obteve valores de R_n de 628,76 a 889,59 $W.m^{-2}$, decorrente da diferença entre saldo de radiação de ondas curtas e ondas longas incidente. Estes resultados diferem da Figura 10, no entanto, os valores de saldo de radiação do presente trabalho são condizentes aos valores computados pela estação meteorológica próxima a região mapeada, no horário próximo aos dados obtidos e descritos no presente trabalho.

Deste modo, a densidade da cultura da Cana-de-Açúcar interfere diretamente no comportamento do saldo de radiação na superfície mapeada no sensoriamento remoto, assim, como Silva et al. (2011) encontraram saldo médio de 576 $W.m^{-2}$, em diferente metodologia, na estimativa da ET e razão de Bowen, valor superior ao 350 $W.m^{-2}$ da região estudada e inferior a 280 $W.m^{-2}$, como descrito por Fausto et al. (2016), na região de Cerrado para a cultura de Cana-de-Açúcar. No mesmo trabalho o R_n encontrado teve média de 175,0 $W.m^{-2}$, valores que oscilam muito em decorrente a inúmeros fatores que não entraram no cálculo do R_n estimado pelo sensoriamento remoto, porém, estão dentro do saldo de radiação quantificados a partir de sensores em estações meteorológicas, que ajudaram a estimar o R_n nas proximidades da região de estudo, neste período.

Assim, a radiação solar incidente na superfície da terra é quantificada como saldo de radiação, cujo fenômeno proporciona aquecimento do ar (fluxo de calor sensível “H”), solo (fluxo de calor no solo “G”) e água (fluxo de calor latente “ λET ”), iniciando, assim, o processo evaporativo, como descrito, por Bastiaansen et al. (1998), Tang et al. (2015) e Zhou et al. (2014). Os valores que variaram entre 280 a 370 $W.m^{-2}$, calculados entres os dias julianos (DJ) 129, 145, 161, 171, 209 e 225, onde os menores valores de R_n , é devido aos maiores valores de albedo (Figura 10) e da temperatura da superfície (Figura 9), verificados nas áreas de solo exposto que, como observados por Machado et al. (2014).

No presente estudo os valores de saldo de radiação, são influenciados pela refletância e absorção de energia a depender da presença ou ausência da Cana-de-Açúcar e estradas, sendo condizentes com o proposto por Teixeira et al. (2009b), onde o R_n é o ponto de partida para analisar a paisagem ou componente da superfície sendo fator determinante no fluxos de calor no solo, sensível e latente.

6.5 Fluxo de Calor no Solo (G)

Os valores do fluxo de calor no solo (G) variaram de acordo com a densidade das plantas de Cana-de-Açúcar, com valores instantâneos oscilando entre 15 a 53 $W.m^{-2}$, nos mapas descritivos na Figura 11.

As diferenças entre os valores de G na área de estudo, de acordo com os dias julianos, como já comentado por outros autores, da-se por diferentes fatores como a incidência da radiação solar na superfície, devido apresentar variabilidade nas escalas diárias mensais e anuais, devido ao movimento aparente do sol, deste modo, o DJ 161 na Figura 8, descreve nitidamente esta mudança de valores, onde os maiores valores estão em regiões onde o solo exposto é predominante, enquanto que na área com cobertura vegetal ocorrem os menores índices de fluxo de calor no solo.

Os resultados do presente trabalho são confirmados por Gomes et al. (2013) ao analisar o balanço de energia à superfície, usando o SEBAL, onde perceberam-se menor G em áreas com uma maior cobertura vegetal, quando comparados com as médias nas áreas com solo exposto.

Os valores médios de fluxo de calor no solo mapeados na Figura 11, ocupam percentuais próximo aos 10% da fração de radiação em $W.m^{-2}$, que compõe o balanço de saldo de radiação, porcentagem próxima aos descritos por Gomes et al. (2013) e por Bastiaanssen (2000). Os valores de G (Figura 11) estão dentro dos encontrados por Andrade (2008), que corroboram em seus resultados com áreas sob o plantio de cultivo da Cana-de-Açúcar, com valores menores que 50 $W.m^{-2}$, assim, como observados no dia Juliano 225, que apresentaram maiores valores no presente estudo. Machado et al. (2014) descreveram que, em cultivo de Cana-de-Açúcar, o G é 10% do R_n , sendo os valores descritos variando entre 55 a 77 $W.m^{-2}$ na área cultivada, onde os maiores valores encontrados na área estudada, foi o dobro dos valores em solo exposto (80 $W.m^{-2}$), para DJ 161.

As medições G obtidos por equipamentos são raros e de difícil acesso na comunidade científica, assim, a importância do seu mapeamento, servindo de parâmetro comparativo para os diferentes dias de imagens estudadas, devido não haver variabilidade de solo e a área ser composta apenas por Cana-de-Açúcar, solo exposto e a boa resolução espectral (pixel de 100m).

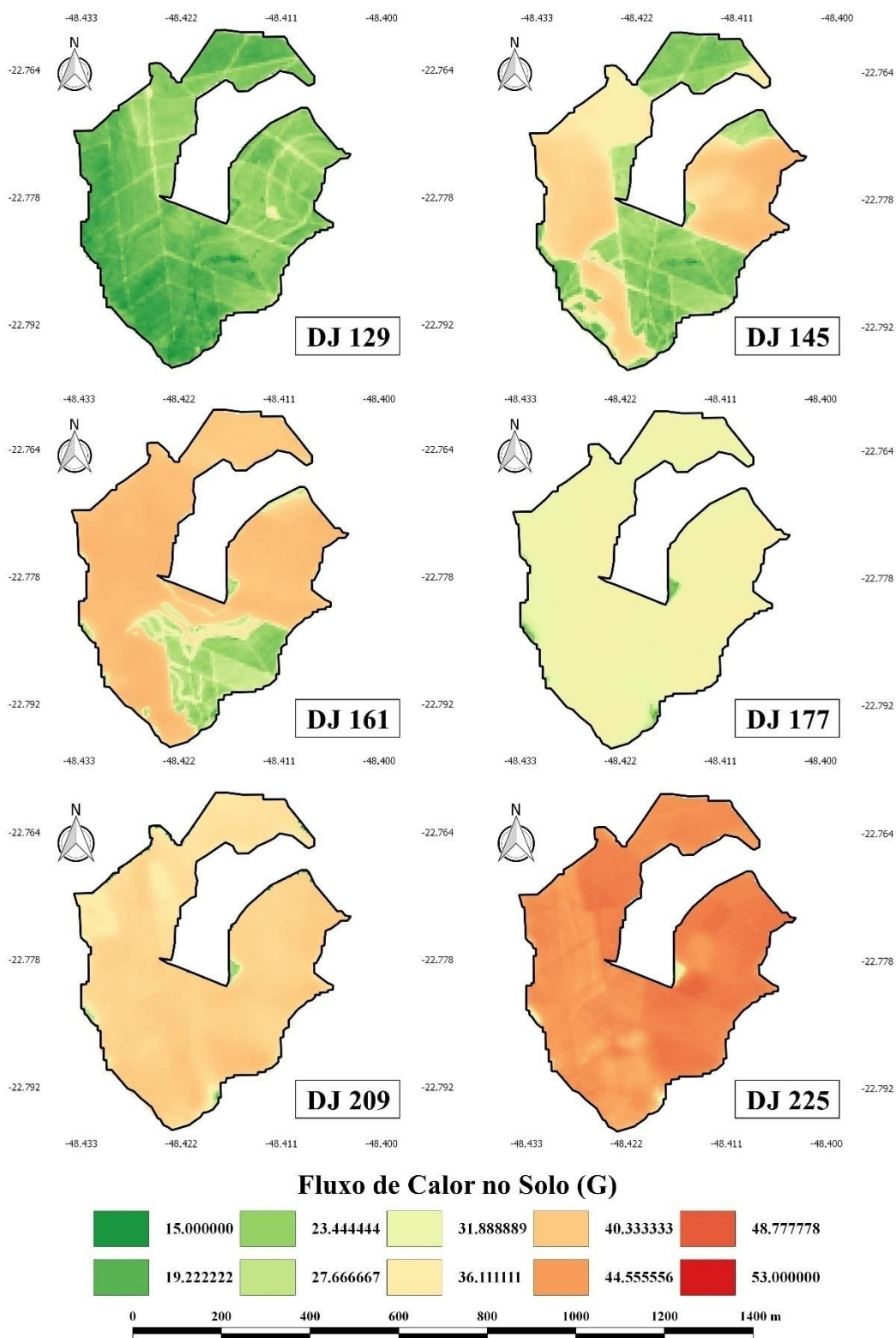


Figura 11. Mapas do Fluxo de Calor no Solo (G) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.

6.6 Fluxo de Calor Sensível (H)

O fluxo de calor sensível varia em função do gradiente de temperatura próximo à superfície, deste modo, sendo em solo exposto ou de pouca densidade vegetativa, os valores de H, são mais elevados como observados na Figura 12. Onde há variação de calor sensível entre 77 a 264 W.m², destacando-se os tons de verde no dia juliano de 129, quando a Cana-de-Açúcar apresenta maior densidade aparente.

Para encontrar estes valores mapeados na Figura 12, no momento da passagem do satélite através do SEBAL, é preciso um processo iterativo, onde os dados de temperatura da superfície foram de fundamental importância na escolha do pixel, de onde foram obtidos os demais dados de entrada para a espacialização dos valores de fluxo de calor sensível. Deste modo, após o processo de estabilização do pixel quente (área de solo exposto) e pixel frio (área úmida), para encontrar o H próximo do real, utilizou-se os valores de Ts, NDVI e albedo mais extremos das cenas estudadas (BASTIAANSEN et al., 1998; TEIXEIRA et al., 2009b).

No DJ 177, os valores elevados de H apresentou provável correlação com o solo exposto e palhada existentes na região, como descrito por Andrade (2008) que, em glebas que continham a mesma situação de solo exposto e palhada, similar a cena registrada pelo Landsat 8 do presente estudo (dia 26 de junho), os valores tendem a serem altos, assim, como também foi confirmado posteriormente por Gomes et al. (2013).

Andrade (2008) encontrou valores médios de H dentro dos apresentados nas imagens na Figura 12, descrevendo assim o fluxo de calor sensível de 216 W.m² para regiões de Cana-de-Açúcar. Os valores de H no presente estudo, condizem com aqueles avaliados por Lira (2008) que, em áreas desprovidas de vegetação, apresentaram valores maiores de H e áreas com cultivo de Cana-de-Açúcar variando entre 173 a 288 W.m⁻².

Os valores médios de fluxo de calor sensível apresentaram um percentual de 53 % do saldo de radiação Rn. O descrito no estudo foi semelhante aos de Machado et al. (2014) onde, em solo exposto, reportaram percentuais similares encontrados (Cana-de-Açúcar).

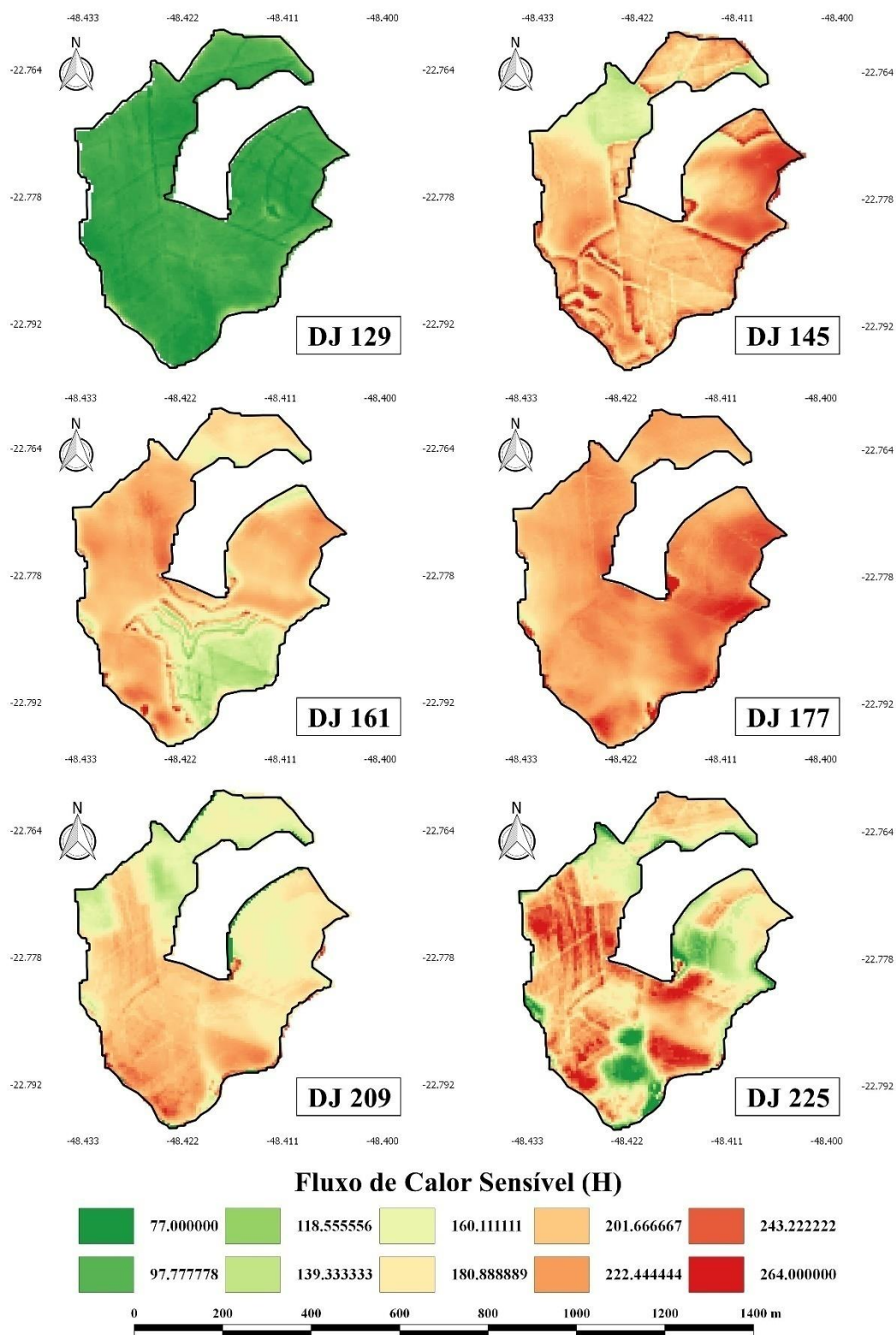


Figura 12. Mapa do Fluxo de Calor Sensível (H) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.

6.7 Fluxo de Calor Latente (λET)

O fluxo de calor latente, descrito na Figura 13, é uma grandeza física que informa a quantidade de energia térmica necessária para uma mudança de estado físico, onde, a água torna-se um dos principais componentes no balanço de energia, assim, sendo o fator direto para a quantificação da capacidade evapotranspirativa da área de estudo, como, no dia juliano 129 onde os maiores valores de λET , variando entre 195 a 243 $W.m^{-2}$, aponta o indicativo de vegetação (Cana-de-Açúcar), com maior contribuição no fluxo de energia transportada por vapor da superfície para atmosfera em todas as direções no momento da passagem do satélite.

Avaliando as menores taxas de λET nos outros dias julianos da Figura 13, percebe-se uma faixa de 30 a 70 $W.m^{-2}$, dar-se em regiões com a Cana-de-açúcar em fase inicial ou solo exposto, como descrito por GOMES et al. (2013), onde descreveram este fenômeno da mudança de fase da água, com valores oscilando entre 4,71 a 598 $W.m^{-2}$, afirmando que os maiores valores estão em corpos d'água, e menores valores em solo exposto e áreas urbanas.

De modo geral, os valores de fluxo de calor latente encontrados apresentaram variabilidade de 30 a 243 $W.m^{-2}$, devido às diferentes condições de superfície nos cenários observados, este λET apresenta entorno de 80 a 85 % do saldo de radiação na área, enquanto a Cana-de-Açúcar está com pleno desenvolvimento, como esperado e proposto por Bastiaanssen (2000), assim como Bezerra et al. (2008), confirmou que o percentual de λET é de aproximadamente 85 % em áreas agrícolas.

Continuando as avaliações do comportamento do fluxo de calor latente na Cana-de-Açúcar, Machado et al. (2014) que, graficamente expressaram a importância deste fenômeno na correlação com o saldo de radiação e evapotranspiração da cultura, afirmando que os valores percentuais da correlação de λET e R_n foram de 80 a 85% e estão condizente, de acordo com os valores dentro dos encontrados no DJ 125 (Figura 13).

Andrade (2008), que mapeou valores de λET em Cana-de-Açúcar, no município de Conquista-MG, encontrou valores similares ao descritos na Figura 13, assim como Lira (2008).

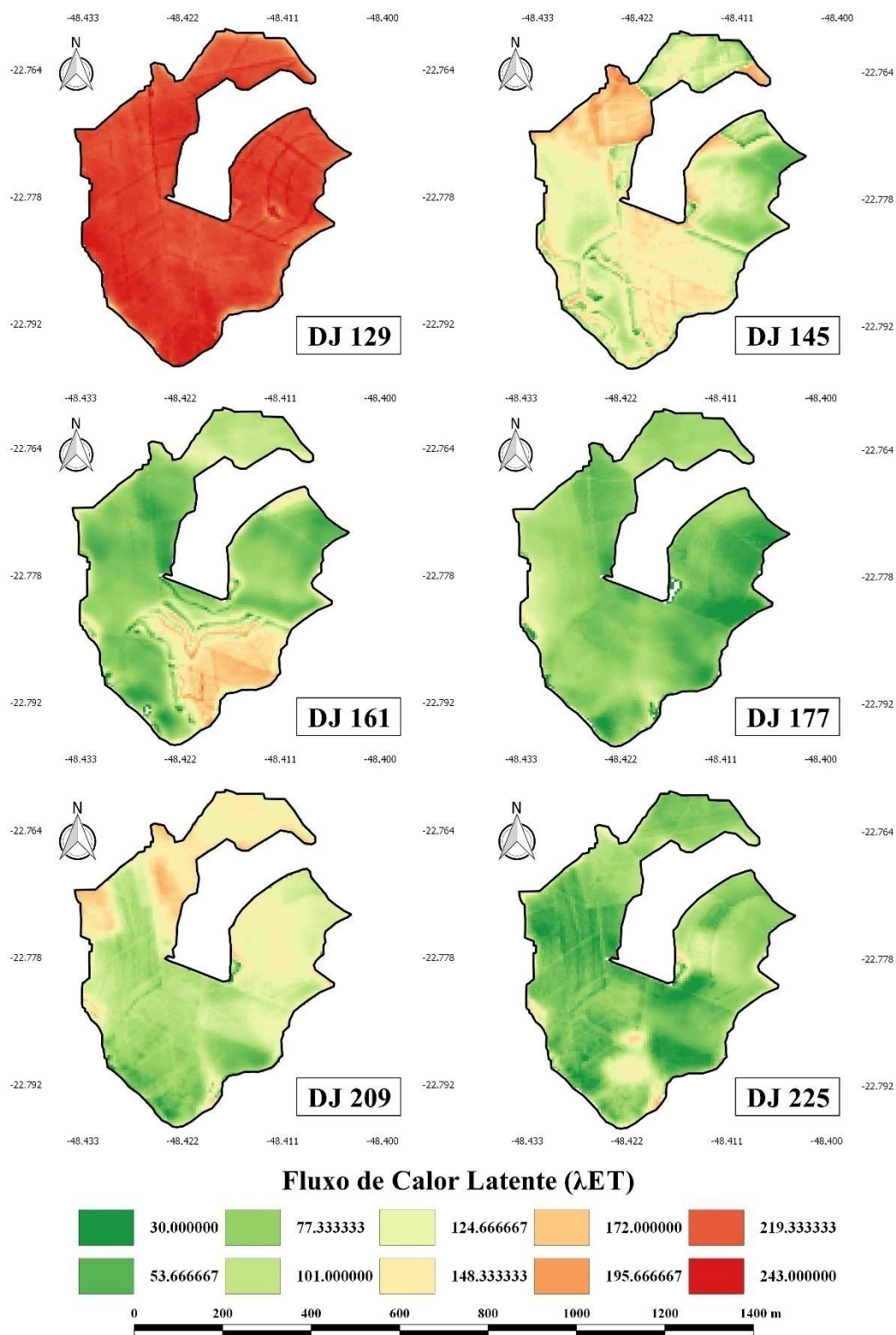


Figura 13. Mapa do Fluxo de Calor Latente (λET) em um cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.

6.8 Evapotranspiração Real Diária ($ET_{diária}$)

O mapeamento da evapotranspiração diária determina a variabilidade espacial de transferência de água da cultura, para a baixa atmosfera potencializando a precisão na tomada de decisão para o manejo de irrigação ou previsão de produção de biomassa. Em grandes áreas cultivadas com Cana-de-Açúcar com auxílio de uma estação meteorológica, encontra-se valores de ET para cada 900 m² representados a cada pixel como pode-se observar na Figura 11.

A $ET_{diária}$ tem variação conforme a altitude da superfície, estágio fisiológico, entre outros fatores, deste modo, estudando a lavoura de Cana-de-Açúcar da fazenda São Manuel, encontrou-se dinâmica de valores entre 0,54 a 2,83 mm.dia⁻¹, coerentes aos de outros autores como Machado et al. (2014), onde na região canavieira utilizando o mesmo algoritmo no litoral sul de Pernambuco, a ET variou de 2 a 5,5 mm.d⁻¹.

Avaliando os valores do DJ-129 que contém maior densidade de plantas, encontrados em Botucatu-SP, de acordo com mapeamento da evapotranspiração por sensoriamento remoto, corroborando com Moraes et al. (2014) que obtiveram variação de ET de 0,41 a 4,86 mm.d⁻¹, com variabilidade espacial climática e futuros impactos sobre o cultivo de Cana-de-Açúcar, onde os valores mais baixos podem ser decorrente de solo exposto e fase inicial de cultivo. Andrade (2008) mapeou a $ET_{diária}$ da Cana-de-Açúcar na área de produção na fazenda Boa Fé, descrevendo valores de 0,8 a 2,8 mm.dia⁻¹. No mesmo ano LIRA (2008) mapearam a $ET_{diária}$ da Cana-de-Açúcar irrigada no submédio do São Francisco, região de Juazeiro-BA, encontrando valores da evapotranspiração de referência medida são iguais a 5,85 a 7,96 mm.dia⁻¹ e, no método de Bower, os valores foram de 4,70 a 6,43 mm.dia⁻¹.

O mapeamento da Figura 14, permite afirmar coerência aos valores obtidos por estimativas de evapotranspiração computadas em diferentes formas, assim como outros autores, de forma pontual, apontaram os valores de ET, como: Silva et al. (2015) a demanda hídrica da Cana-de-Açúcar irrigada por gotejamento, nos tabuleiros costeiros de Alagoas, com ET média em três ciclos de 1,73 a 5,04 mm.d⁻¹;

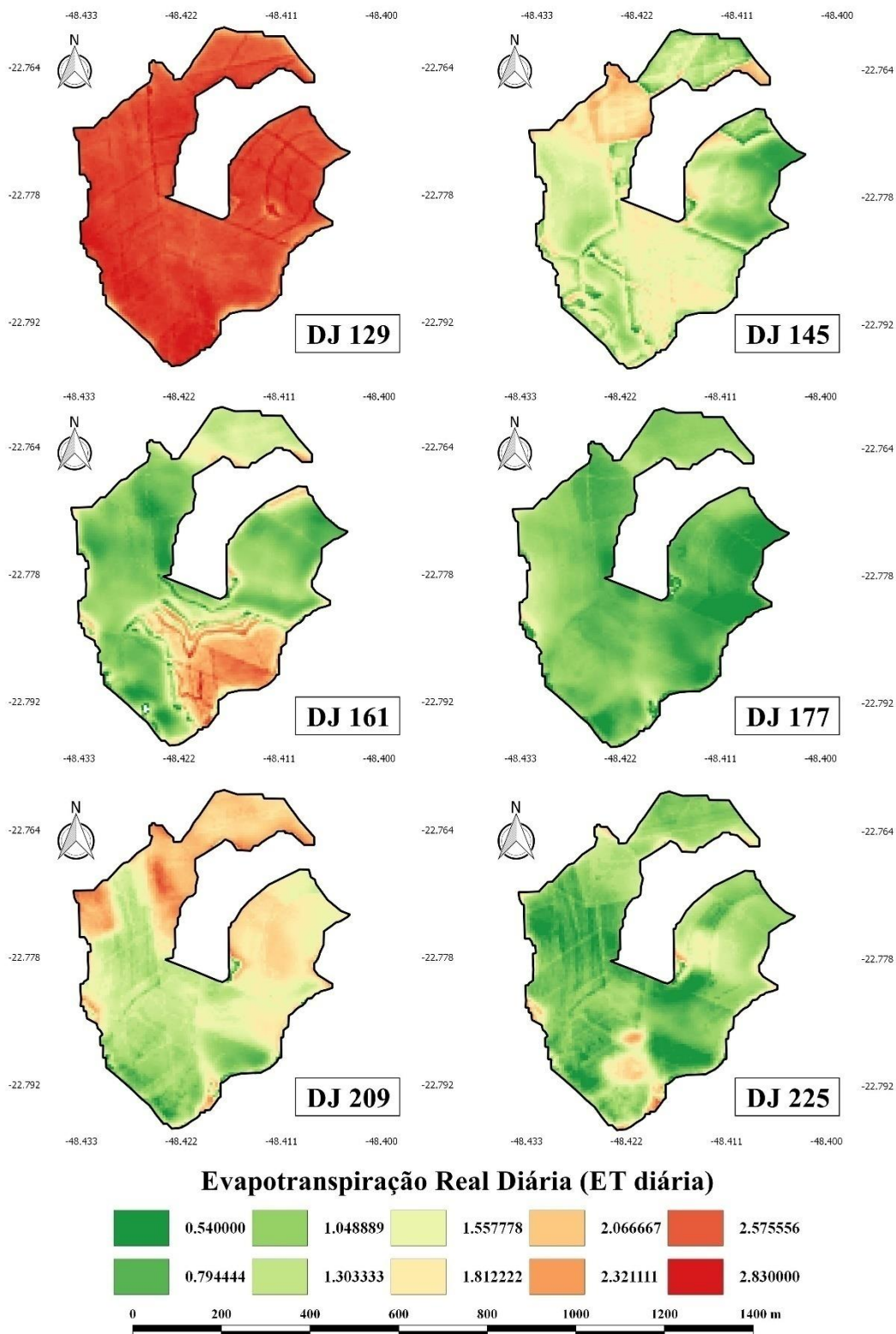


Figura 14. Mapa da evapotranspiração diária do cultivo de Cana-de-Açúcar no ano de 2015, da fazenda São Manuel, localizada no município de Botucatu-SP.

Silva et al. (2015b), com mesma cultura em experimentos de campo no município de Capim – PB, testando diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração, encontraram valores médios ao longo de um ciclo da cultura de 3,74 a 4,86 mm.d⁻¹.

Os valores de evapotranspiração de 1,58 a 5,9 mm.dia⁻¹, encontrados por Teodoro et al., (2015), em estudo de balanço hídrico apontam condições de estresse hídrico na cultura, devido à má distribuição chuva, reforçando a suposição da necessidade de mapas de evapotranspiração por sensoriamento remoto, no âmbito de monitorar e corrigir este problema nas demais áreas de produção canavieira, assim como observado na Figura 14.

As variabilidades climáticas interferem na evapotranspiração, conseqüentemente, no balanço hídrico, podendo ocasionar áreas sazonais de estresse hídrico, originando perda de produtividade ou a não rentabilidade econômica da Cana-de-Açúcar, deste modo, Santos e Sentelhas (2012) avaliaram os impactos das mudanças climáticas, a partir da série temporal (1979-2008), em canaviais de Araçatuba, Assis, Jaboticabal e Piracicaba estado de São Paulo, encontrando variação de ET em valores respectivos de 4,17 a 5,88 mm.dia⁻¹, 3,41 a 5,53 mm.dia⁻¹, 3,72 a 5,64 mm.dia⁻¹ e 3,37 a 5,50 mm.dia⁻¹, ocasionando déficit de 550, 650, 530 e 720 mm.ano⁻¹, demandando, assim, para anos futuros, investimentos de sistemas de irrigação em canaviais, para que não haja perda de produtividade por déficit hídrico.

Os dados climáticos de evapotranspiração das Figuras 13, 15 e 16, quando confrontados com dados expostos na Figura 14, teoria proposta por Allen et al. (1998), afirma que o comportamento da ET diária, ET instantânea e Kc são condizentes como o real. Assim, pode-se assegurar a veracidade dos valores mapeados pelo algoritmo SEBAL, quando os valores comparados com resultados estimados por Teixeira et al. (2016), que por sensoriamento remoto, encontraram valores entre 0,6 a 4,0 milímetros de água perdidas em regiões produtoras de Cana-de-Açúcar por evapotranspiração para o estado de São Paulo.

7 CONCLUSÕES

Pelos resultados encontrados, pode-se concluir:

- os valores mapeados pelo algoritmo SEBAL demonstraram plena coerência quando comparados aos valores de evapotranspiração calculados por Penman-Monteith, assim como validado por outros trabalhos do gênero;
- a evapotranspiração diária especializadas pelo SEBAL em Cana-de-Açúcar, demonstraram grande potencial para apontar zonas críticas de déficit hídrico na cultura de Cana-de-Açúcar e para demais culturas agrícolas;
- o algoritmo SEBAL apresentou eficiência no mapeamento de grandes áreas com Cana-de-Áçucar, a fins de monitoramento da evapotranspiração, sendo fator limitante as poucas imagens do Landsat 8 sem nuvens e a resolução temporal de 16 dias.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, D. A. DE et al. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 3, p. 440–451, set. 2009.

ALLEN, R. G. et al. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning**, Irrigation and Drainage Systems. v. V.19, p. P.251-268, 2005.

ALLEN, R. G. et al. **FAO Irrigation and Drainage Paper - fao56.pdf** Food and Agriculture Organization (FAO), , 1998. Disponível em: <<http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2015

ANDRADE, R. G. **Aplicação do algoritmo sebal na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar**. TESE DE DOUTORADO—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008.

ANDRÉ, R. G. B. et al. Energy aspects on the sugar cane development. Part 1: radiation balance and derived parameters. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 375–382, set. 2010.

AVENDAÑO, L. et al. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de chile bell en el Valle de Culiacán, México. **Terra Latinoamericana**, v. 33, n. 3, p. 209–219, set. 2015.

AZEVEDO, P. V. DE et al. Availability of energy for sugarcane in the coastal plains of Paraíba state. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1031–1038, out. 2014.

BASTIAANSEN, W. G. M. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p. 198–212, dez. 1998.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n. 1–2, p. 87–100, 27 mar. 2000.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. DA; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 305–317, set. 2008.

BRILLANTE, L. et al. Variations in soil-water use by grapevine according to plant water status and soil physical-chemical characteristics—A 3D spatio-temporal analysis. **European Journal of Agronomy**, v. 77, p. 122–135, jul. 2016.

CABRAL, O. M. R. et al. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 5, p. 555–565, 1 set. 2012.

CARVALHO, C.; VENCATO, A. .; KIST, B. . Anuário Brasileiro da Cana-de-Açúcar de 2011. **Anuário Brasileiro da Cana-de-Açúcar de 2011.**, p. 132pp, 2011.

CESCHIA, E. et al. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, The carbon balance of European croplands. v. 139, n. 3, p. 363–383, 15 nov. 2010.

DA SILVA, A. F. et al. Estimation of croplands using indicator kriging and fuzzy classification. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 111, p. 1–11, fev. 2015.

DANTAS, M. J. F. **evapotranspiração na Sub-Bacia do riacho Jardim-CE, por Sensoriamento Remoto**. TESE DE DOUTORADO—BOTUCATU-SP: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 20 dez. 2013.

DELGADO, R. C. et al. Spectral classification of planted area with sugarcane through the decision tree. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 2, p. 369–380, abr. 2012.

FAUSTO, M. A. et al. Impact of land-use change in the net radiation of the Cerrado of the southern Mato Grosso. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 2, p. 350–361, jun. 2016.

FERNANDES, J. L.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Sugarcane yield estimates using time series analysis of spot vegetation images. **Scientia Agrícola**, v. 68, n. 2, p. 139–146, abr. 2011.

GIONGO, P. R. et al. Surface albedo from Landsat 5 images in areas of sugar cane and cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 279–287, mar. 2010a.

GIONGO, P. R. et al. **Uso de sensoriamento remoto para estimar o saldo de radiação em áreas de cana-de-açúcar e cerrado**, Revista Científica Eletrônica de Agronomia. v. 18, n. n.1, p. p.8-21, jun. 2010b.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Surface albedo through TM-Landsat 5 images and Digital Terrain Model. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 8, p. 833–838, ago. 2014.

GOMES, L. C. F.; SANTOS, C. A. C. DOS; ALMEIDA, H. A. DE. Balanço de Energia à Superfície para a Cidade de Patos - PB Usando Técnicas de Sensoriamento Remoto (Surface Energy Balance for the Patos City-PB Using Remote Sensing Techniques). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 1, p. 015–028, 17 jul. 2013.

JENA, S. D.; POGGI, M. Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming. **European Journal of Operational Research**, v. 230, n. 2, p. 374–384, 16 out. 2013.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. [s.l.] NOBEL, 1984.

LEDA, V. C. et al. Índices de Vegetação na caracterização da bacia do Ribeirão da Prata, Lençóis Paulista - SP. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 1, 30 mar. 2016.

LI, Y.-L. et al. Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid region of north China. **Agricultural Water Management**, v. 61, n. 1, p. 1–12, 6 jun. 2003.

LI, Z. et al. Retrieval of the surface evapotranspiration patterns in the alpine grassland–wetland ecosystem applying SEBAL model in the source region of the Yellow River, China. **Ecological Modelling**, v. 270, p. 64–75, dez. 2013.

LIRA, V. M. DE. **Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de-açúcar mediante imagens orbitais na região do sub médio São Francisco**. TESE DE DOUTORADO—Campo Grande - MS: Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2008.

LIU, W. T. . **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande - MS: Ed. UNIDERP, 2007.

MACHADO, C. . et al. **Estimativa do balanço de energia utilizando imagens tm – landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de PERNAMBUCO**, v. v.29, n. n.1, p. 55–67, 2014.

MAHMOUD, S. H.; ALAZBA, A. A. A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and southern regions of Saudi Arabia. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 124, p. 269–283, 1 jul. 2016.

MAPA. **Ministra parabeniza produtores pelo crescimento do PIB da Agropecuária**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2015/05/ministra-parabeniza-produtores-pelo-crescimento-do-pib-da-agropecuaria>>. Acesso em: 26 out. 2015.

MARIN, F. R. **Variedades**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_42_1110200717570.html>. Acesso em: 8 maio. 2016.

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Determination of total accumulated rainfall, global radiation, evapotranspiration and degree-days originated from

the ECMWF model to sugar cane crop. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 2, p. 322–331, abr. 2014.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. [s.l.] oficina de textos, 2012.

PRIETO, I.; ARMAS, C.; PUGNAIRE, F. I. Water release through plant roots: New insights into its consequences at the plant and ecosystem level. **New Phytologist**, v. 193, n. 4, p. 830–841, 2012.

REICHARDF, K.; TIMM. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. 2ª edição ed. [s.l.] Manole, 2012.

ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. S. – S. A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance. **A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance**, v. v.25, n. n.2, p. p.147-157, 2000.

SANDHU, H. S. et al. Effects of sugarcane harvest method on microclimate in Florida and Costa Rica. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 177, p. 101–109, 15 ago. 2013.

SANTOS, J. E. O. et al. IMAGENS DO LANDSAT- 8 NO MAPEAMENTO DE SUPERFÍCIES EM ÁREA IRRIGADA. **IRRIGA**, v. 1, n. 2, p. 30, 31 ago. 2015.

SANTOS, C. A. C. DOS et al. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 383–392, set. 2010.

SANTOS, D. L. DOS; SENTELHAS, P. C. Climate change scenarios and their impact on the water balance of sugarcane production areas in the State of São Paulo, Brazil. **Revista Ambiente & Água**. v. 7, n. 2, p. 07–17, jun. 2012.

SARTORI, A. A. DA C. **Geoestatística multivariada na delimitação de zonas de manejo na cultura de cana-de-açúcar**. TESE DE DOUTORADO—BOTUCATU-SP: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014.

SILVA, B. K. N. et al. Sensitivity analysis of methods for estimating reference evapotranspiration and sugarcane evapotranspiration. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1046–1053, out. 2011a.

SILVA, L. C. et al. Estimative of radiation balance by remote sensing of different soil uses in the brazilian southern Amazon. **Sociedade & Natureza**. v. 27, n. 2, p. 341–356, ago. 2015a.

SILVA, S. et al. Water requirement of drip irrigated sugarcane in the Coastal Lands of Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 9, p. 849–856, set. 2015b.

SILVA, T. G. F. DA et al. Water requirement and efficiency of water use of irrigated sugarcane in semi-arid Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 12, p. 1257–1265, dez. 2011b.

SILVA, V. DE P. R. DA et al. Methods for estimating the sugarcane evapotranspiration under rainfed conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 411–417, maio 2015c.

SUN, Z. et al. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. **Mathematical and Computer Modelling**, Mathematical and Computer Modeling in agriculture (CCTA 2010). v. 54, n. 3–4, p. 1086–1092, ago. 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5 ed ed. Porto Alegre: [s.n.].

TANG, R. et al. Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 174–175, p. 28–42, 15 jun. 2013.

TARTARI, R. et al. Evaluation of biophysical indices from TM Landsat 5 images in heterogeneous landscape in Southwestern Amazon. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 4, p. 943–953, dez. 2015.

TASUMI, M. et al. Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. **Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering. p. P.94-109, 2005.

TEIXEIRA, A. H. DE C. et al. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part B: Application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3–4, p. 477–490, 11 mar. 2009a.

TEIXEIRA, A. H. DE C. et al. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3–4, p. 462–476, 11 mar. 2009b.

TEIXEIRA, A. H. DE C. et al. Modelling radiation and energy balances with Landsat 8 images under different thermohydrological conditions in the Brazilian semi-arid region. p. 14, 14 out. 2015.

TEIXEIRA, A. H. DE C. et al. Sugarcane Water Productivity Assessments in the São Paulo state, Brazil. v. 6, p. 12, 2016.

TEODORO, I. et al. Weather variables, water balance, growth, and agro industrial yield of sugarcane. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 1, p. 76–88, fev. 2015.

WARREN, M. et al. Utilização do Sensoriamento Remoto Termal na Gestão de Recursos Hídricos (Utilization of Thermal Remote Sensing in Water Resource Management). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 1, p. 066–082, 4 jan. 2014.

WONG SAK HOI, L.; MARTINCIGH, B. S. Sugar cane plant fibres: Separation and characterisation. **Industrial Crops and Products**, v. 47, p. 1–12, maio 2013.

YANG, J. et al. Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 10, p. 2065–2076, 1 out. 2015.

ZANZARINI, F. V. et al. Spatial correlation of the vegetation index (NDVI) of a Landsat/ETM+ images with soil attributes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608–614, jun. 2013.

ZHANG, X. et al. Simplified SEBAL method for estimating vast areal evapotranspiration with MODIS data. **Water Science and Engineering**, v. 4, n. 1, p. 24–35, 1 mar. 2011.

ZHOU, X. et al. Comparison of ET estimations by the three-temperature model, SEBAL model and eddy covariance observations. **Journal of Hydrology**, v. 519, Part A, p. 769–776, 27 nov. 2014.