



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

Diego Gonçalves Feitosa

Programa de Pós-graduação em Agronomia

***AVALIAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DO BALANÇO DE
RADIÇÃO, DE ENERGIA E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO
NOROESTE PAULISTA, FACE A MUDANÇA NO USO DO SOLO***

ILHA SOLTEIRA - SP
FEVEREIRO/2014

Diego Gonçalves Feitosa

Programa de Pós-graduação em Agronomia

***AVALIAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DO BALANÇO DE
RADIÇÃO, DE ENERGIA E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO
NOROESTE PAULISTA, FACE A MUDANÇA NO USO DO SOLO***

Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez

Orientador

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção

ILHA SOLTEIRA

FEVEREIRO/2014

DEDICO

*Ao meu pai **Tercio Lopes Feitosa**, por sua coragem, bondade, fibra, humildade, sabedoria e compreensão, por ser o meu maior exemplo como pai e como homem, tudo que sou hoje e que serei amanhã devo a você pai.*

*À minha mãe **Marcionilia Gonçalves Feitosa** pelo amor de mãe, por cada lágrima derrubada, por cada oração, pelas noites em claro, pelos conselhos, “puxões de orelha”, ensinamentos de vida, força de vontade e perseverança.*

*À minha irmã **Daiely Gonçalves Feitosa** por me proporcionar o prazer e a felicidade de ser um IRMÃO, pelas brigas quando crianças, pelos segredos quando adolescentes e pelos conselhos quando adultos.*

*À minha namorada **Letícia Louzada Ferreira**, pelo carinho, apoio e compreensão. Por estar ao meu lado sempre e me ajudar na luta do cotidiano. Obrigado amor!*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente À DEUS, por me dar o dom da vida, pela minha saúde, pelo seu amor incondicional por todas as oportunidades que me permitiram chegar até aqui e pelas pessoas que ele colocou em meu caminho e que me conduziram até este momento.

A minha família por sempre me apoiar nas minhas escolhas, por sempre estar ao meu lado nos momentos de alegria e de tristeza e por todo sacrifício que fizeram para viabilizar os meus estudos.

Ao Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez, pela amizade, orientação, paciência e ensinamentos que tomarei como referência para o resto da vida.

Aos demais professores e funcionários pelo suporte e ensinamentos prestados, por sempre se empenharem ao máximo para nos proporcionar o melhor aperfeiçoamento profissional possível.

Aos colegas do laboratório de Hidráulica e Irrigação pela amizade e auxílio na condução do trabalho, em especial à Renato A. M. Franco pelas dúvidas esclarecidas.

Aos meus colegas de trabalho que sempre torceram por mim e me auxiliaram nas tarefas profissionais do meu dia a dia.

À minha segunda Família, que são os meus amigos do GOU ANGELUS, irmãos unidos por Deus em torno do sonho de ajudarmos a construir uma universidade renovada.

A todos os meus amigos em especial aos amigos de república, companheiros que estiveram ao meu lado nos momentos de alegria, e principalmente nos momentos de dificuldades.

A FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro através do projeto “Modelagem da Produtividade da Água em Bacias Hidrográficas com Mudanças de Uso da Terra” (Processo 2.009/52.467-4)

*E a todos que fizeram parte do meu Mestrado, jamais esquecerei de vocês, **UM GRANDE ABRAÇO DO PIRO, SENTIREI SAUDADES!***

“É preciso amar as pessoas como se não houvesse amanhã”

Dado Vila Lobos/Renato Russo

RESUMO

Os municípios de Ilha Solteira, Itapura, Pereira Barreto, Sud Mennucci e Suzanápolis, localizados na região do noroeste paulista, desde 2006 passou por uma grande mudança no uso e ocupação do solo, onde a cultura da cana-de-açúcar teve uma grande expansão ocupando as áreas que antes eram ocupadas por pastagens. Essa drástica mudança do uso do solo pode levar a uma mudança no balanço de energia, interferindo assim no clima da região. Neste contexto, esse trabalho teve como objetivo avaliar o balanço de radiação, de energia e evapotranspiração na região do noroeste paulista, utilizando técnicas de sensoriamento remoto através do algoritmo SAFER, que foi aplicado a 16 imagens divididas em dois períodos, sendo o primeiro de 2001 a 2004 e o segundo de 2008 a 2011. A área total de produção da cultura da cana-de-açúcar na região de estudo teve uma grande expansão principalmente entre anos de 2006 a 2007 e de 2007 a 2008, passando de 17.542 ha em 2006 para 58.541 ha em 2008, o que representa um aumento de 333,7%, com expansão de pouco mais de 15.000 ha em 2007 e 25.000 ha em 2008 e chegando a 2011 a 72.269 hectares. Nestas condições, avaliando os parâmetros do balanço de radiação, de energia e evapotranspiração para dois períodos citados, encontrou-se um aumento nos valores de Albedo e da relação H/R_n , após a expansão da cana-de-açúcar na região, enquanto os dados de NDVI, ET_a/ET_0 e $\lambda E/R_n$ apresentaram uma redução nos valores médios para o mesmo período. Ao se relacionar o valor médio obtido para toda a área de estudo, com os valores médios para algumas classes de uso do solo, as áreas de cana-de-açúcar e de pastagem apresentaram elevados valores de R^2 , demonstrando uma grande influência da expansão da cultura da cana-de-açúcar e da degradação das pastagens na alteração desses parâmetros do balanço de radiação e de energia. O consumo de água na região, considerando a área total de estudo de 280.591 hectares e utilizando o valor médio de ET_a de $1,73 \text{ mm dia}^{-1}$ referente a média de todo o período avaliado para toda a área de estudo, é da ordem de $4.854.224,3 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. radiação. SAFER. evapotranspiração

ABSTRACT

Ilha Solteira, Itapura, Pereira Barreto, Sud Mennucci and Suzanápolis municipalities are located in the São Paulo northwestern region, since 2006 has undergone a major change in the use and occupation of land where the culture of cane sugar had a major expansion occupying areas that were once used for pasture. This drastic change of land use might lead to a change in the energy balance, just like that interfering with the climate of region. In this context, this study aimed to evaluate the radiation balance, energy and evapotranspiration in the São Paulo northwest region using remote sensing techniques through the SAFER algorithm, which was applied to 16 images divided into two periods, the first being 2001 to 2004 and the second of 2008 to 2011. The total area of crop production of cane sugar in the study region had a major expansion mainly between 2006 to 2007 and 2007 to 2008, increasing from 17.542 ha in 2006 to 58.541 ha in 2008, representing a increase of 333.7 %, an increase of just over 15.000 ha in 2007 to 25.000 ha in 2008 and reaching 72.269 ha in 2011. Accordingly, evaluating the parameters of the radiation balance, energy and evapotranspiration for the periods aforementioned, we found an increase in the values of albedo and H/R_n , after the expansion of cane sugar in the region, while NDVI data, and ET_a/ET_0 , $\lambda E/R_n$ showed a decrease in mean values for the same period. When related to the average value obtained for the entire study area, with the average values for some classes of land use, areas of sugar cane and pasture had high R^2 values, demonstrating a strong influence of the expansion of cultivation of sugar cane and pasture degradation in changing these parameters of the radiation balance and energy. Water consumption in the region, considering the entire study area of 280.591 ha and using the average value of ET_a of 1.73 mm day^{-1} refers to average throughout the period evaluated for the entire study area is approximately $4.854.224.3 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$.

Keywords: Sugar cane. radiation. SAFER. evapotranspiration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balanço de radiação	19
Figura 2 - Localização dos municípios estudados no noroeste paulista.....	26
Figura 3 - Fluxograma esquemático para o cálculo da evapotranspiração real por meio do algoritmo SAFER	32
Figura 4 - Áreas totais de expansão, reforma e cultivada com a cultura da cana-de-açúcar no noroeste paulista.....	40
Figura 5 - Evolução das áreas de cana-de-açúcar no noroeste paulista de 2001 a 2006	41
Figura 6 . Evolução das áreas de cana-de-açúcar no noroeste paulista de 2007 a 2011	42
Figura 7 - Valores médios de radiação global incidente no noroeste paulista	45
Figura 8 - Valores médios de radiação global emitida pela superfície no noroeste paulista.....	46
Figura 9 - Valores de RG_{\downarrow} e RG_{\uparrow} em correlação ao Dia Juliano (DJ) da imagem.....	47
Figura 10 - Valores médios de radiação de onda longa incidente no noroeste paulista	47
Figura 11 - Valores médios de radiação de onda longa emitidas no noroeste paulista .	48
Figura 12 - Valores médios de saldo de radiação no noroeste paulista.....	49
Figura 13 - Valores médios da relação R_n/R_g no noroeste paulista.....	50
Figura 14 - Valores médios de Albedo no noroeste paulista.....	51
Figura 15 - Valores de albedo para o noroeste paulista para o período de 2001 a 2004	52
Figura 16 - Valores de albedo para o noroeste paulista para o período de 2008 a 2011	53
Figura 17 - Valores médios Albedo para toda a área de estudo e para a cultura da cana-de-açúcar Fonte: Dados do próprio autor	54
Figura 18 - Mapas de Albedo e composição natural para o município de Itapura na data de 26 de agosto de 2009	55
Figura 19 - Dispersão dos valores médios de albedo para a área total de estudo em relação a diferentes classes de uso e ocupação do solo	56
Figura 20 - Valores médios de NDVI para o noroeste paulista.....	59
Figura 21 - Valores de NDVI no noroeste paulista para o período de 2001 a 2004	60
Figura 22 - Valores de NDVI no noroeste paulista para o período de 2008 a 2011	61
Figura 23 - Valores médios de NDVI para toda área de estudo e para a cultura da cana-de-açúcar.....	62
Figura 24 - Mapas de NDVI e composição natural para o município de Itapura na data de 26 de agosto de 2009	63

Figura 25 - Dispersão dos valores médios de NDVI para a área total de estudo em relação a diferentes classes de uso e ocupação do solo	64
Figura 26 - Valores médios de ET_a para o noroeste paulista	65
Figura 27 - Dispersão entre as médias de ET_a e NDVI	66
Figura 28 - Valores médios de ET_a/ET_0 no noroeste paulista.....	67
Figura 29 - Valores de ET_a/ET_0 no noroeste paulista para o período de 2001 a 2004 .	68
Figura 30 - Valores de ET_a/ET_0 no noroeste paulista para o período de 2008 a 2011 .	69
Figura 31 - Valores médios de ET_a/ET_0 para toda área de estudo e para a cultura da cana-de-açúcar	70
Figura 32 - Mapas de ET_a/ET_0 e composição natural para o município de Itapura na data de 26 de agosto de 2009.....	71
Figura 33 - Dispersão dos valores médios de ET_a/ET_0 para a área total de estudo em relação a diferentes classes de uso e ocupação do solo	72
Figura 34 - Dados médios de $\lambda E/R_n$ para o noroeste paulista.....	73
Figura 35 - Valores de $\lambda E/R_n$ no noroeste paulista para o período de 2001 a 2004	73
Figura 36 . Valores de $\lambda E/R_n$ no noroeste paulista para o período de 2008 a 2011	74
Figura 37 - Valores médios de $\lambda E/R_n$ para toda área de estudo e para a cultura da cana-de-açúcar.....	76
Figura 38 - Mapas de $\lambda E/R_n$ e composição natural para o município de Itapura na data de 26 de agosto de 2009.	77
Figura 39 - Dispersão dos valores médios de $\lambda E/R_n$ para a área total de estudo em relação a diferentes classes de uso e ocupação do solo	78
Figura 40 - Dados médios de H/R_n para o noroeste paulista	79
Figura 41 - Valores de H/R_n no noroeste paulista para o período de 2001 a 2004.....	80
Figura 42 - Valores de H/R_n no noroeste paulista para o período de 2008 a 2011	81
Figura 43 . Valores médios de H/R_n para toda área de estudo e para a cultura da cana-de-açúcar.....	82
Figura 44 . Mapas de H/R_n e composição natural para o município de Itapura na data de 26 de agosto de 2009	83
Figura 45 - Dispersão dos valores médios de H/R_n para a área total de estudo em relação a diferentes classes de uso e ocupação do solo	84
Figura 46 - Dados médios de Temperatura de Superfície para o noroeste paulista	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Áreas dos municípios que compoem a região de estudo.....	25
Tabela 2 - Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).	28
Tabela 3 - Coeficientes para o cálculo do albedo planetario para cada banda do Landsat TM5.	30
Tabela 4 - Área total de cultivo da cana-de-açúcar no noroeste paulista	36
Tabela 5 - Área anual de expansão da cultura de cana-de-açúcar	37
Tabela 6 - Áreas de reforma da cana-de-açúcar no noroeste paulista	38
Tabela 7 - Porcentagem da área do município ocupada com a cultura da cana-de-açucar	39
Tabela 8 - Data da imagem, Dia Juliano (D.J.) e radiação de ondas curtas incidentes ($R_g\downarrow$), radiação de ondas curtas emitidas pela superfície ($R_r\uparrow$), radiação de ondas longas incidentes ($R_l\downarrow$) e radiação de ondas longas emitidas ($R_l\uparrow$), saldo de radiação (RN), Relação RN/RG e albedo.....	44
Tabela 9 - Data da imagem, dia juliano (D.J.), NDVI, evapotranspiração atual (ETa), relação ETa/ETo, relação fluxo de calor latente pelo saldo de radiação $\lambda E/R_n$, relação fluxo de calor sensível pelo saldo de radiação (H/R_n) e temperatura de superfície (TS)	57
Tabela 10 - Condições hídricas da região do noroeste paulista nas datas das imagens.	58
Tabela 11 . Valores médios de ETa para diferentes classes de uso e ocupação do solo para todo o período de avaliação.	87

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	DESENVOLVIMENTO	12
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1.1	Bacias Hidrográficas	12
2.1.2	Mudança no Uso e Ocupação do Solo	14
2.1.3	Agricultura Irrigada.....	15
2.1.4	O Uso Do Sensoriamento Remoto na Agricultura	16
2.1.5	Balanco de Radiação e de Energia	17
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	24
2.2.1	Caracterização da Área de Estudo.....	24
2.2.2	Aquisição de Imagens e Dados Agrometeorológicos	26
2.2.3	Processamento	27
2.2.3.1	Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância	28
2.2.3.2	Cálculo de reflectância	29
2.2.3.3	Albedo no topo da atmosfera	29
2.2.3.4	Albedo de superfície	30
2.2.3.5	Temperatura de superfície	30
2.2.3.6	Índice de vegetação de diferença normalizada-NDVI	31
2.2.3.7	Evapotranspiração em escala regional utilizando o algoritmo SAFER	31
2.2.3.8	Cálculo do Balanco de Energia	33
2.2.4	Avaliação dos Resultados Obtidos.....	34
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
2.3.1	Área de Cana-de-Açúcar	35
2.3.2	Balanco de Energia.....	43
2.3.3	NDVI, Consumo de Água e Fluxos de Energia	57
2.3.4	Estimativa do Consumo de Água na região de estudo	86
3	CONCLUSÕES.....	87
4	REFERÊNCIAS	88

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas podem levar a alterações no zoneamento agrícola, chegando a levar certas culturas a migrarem de tradicionais regiões produtoras, por melhores condições climáticas (MORAES et al., 2011). Porém, pouco vem sendo estudado sobre as mudanças climáticas que podem ocorrer em uma região, com a entrada em longas áreas contínuas de uma determinada cultura.

Esse cenário de mudança do uso e ocupação do solo é encontrado em praticamente todo o Estado de São Paulo, onde segundo Camargo et al. (2008) entre os anos de 2001 a 2006, 1,45 milhões de hectares tiveram a sua ocupação substituída por novas culturas; deste total, 69,79% eram ocupadas anteriormente pela pastagem, sendo que a cultura que mais ocupou essas novas áreas foi a cana-de-açúcar, com 67,33% do total cedido.

Essa mesma mudança no uso do solo também vem sendo observada na região noroeste do Estado de São Paulo, região esta com economia essencialmente agrícola - baseada principalmente na bovinocultura - vem paulatinamente substituindo esta atividade por outras de maior interesse econômico, como a fruticultura (viticultura, anonáceas, abacaxizeiro, bananeira, coqueiro, citros, goiabeira, mangueira e maracujazeiro), mas principalmente a cultura da cana de açúcar.

Ainda segundo Camargo et al. (2008) na região de Andradina, localizada no noroeste paulista, a porcentagem absorvida pela cana de açúcar chegou a 75,37% das áreas que sofreram mudança de uso da terra.

Esse comportamento de mudança de uso da terra também foi observado por Santos e Hernandez (2013) no município de Ilha Solteira, onde a cultura iniciou na região desde 2006, em áreas que antes eram predominantemente de pastagens, as quais, de acordo com Freitas-Lima, Silva e Altinare (2004), ocupavam no ano de 2003, uma extensão territorial de 432,28 Km², representando 66,79% da área municipal. Palla et al. (2011) corroboram com essa informação e mostram que de apenas 68 hectares na safra 2004/2005, a cana-de-açúcar passou a 14.714 hectares em 2009, cultivada em áreas que antes se encontravam com pastagem.

Essa mudança no uso e ocupação do solo, leva a alterações no balanço de radiação e de energia devido a interação entre a radiação, planta e solo, onde cada cultura possui características particulares de desenvolvimento, passando por diferentes estádios

fenológicos ao decorrer do ano, proporcionando épocas com maior e menor recobrimento do solo.

Tais alterações no balanço de radiação e de energia podem levar a mudanças em parâmetros como a evapotranspiração de referência e a temperatura de superfície, fatores estes que são de suma importância devido à proximidade entre as zonas rurais e urbanas.

Essas alterações ganham ainda mais importância na região do noroeste paulista por ser uma região com déficits hídricos prolongados ao longo de oito meses por ano e a por possuir a maior taxa de evapotranspiração do Estado de São Paulo, além da suscetibilidade a veranicos (SANTOS; HERNANDEZ; ROSSETTI, 2010; HERNANDEZ; LEMOS FILHO; BUZETTI, 1995; HERNANDEZ et al., 2003). Tais condições deixam claro a necessidade de se avaliar o balanço de energia e radiação na região de estudo, a fim de se constatar uma possível alteração decorrente da mudança de uso e ocupação do solo.

Neste contexto, esse trabalho teve como objetivo avaliar o balanço de radiação, de energia e evapotranspiração na região do noroeste paulista, utilizando técnicas de sensoriamento remoto através do algoritmo SAFER, que foi aplicado a 16 imagens divididas em dois períodos, sendo o primeiro de 2001 a 2004 e o segundo de 2008 a 2011.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Bacias Hidrográficas

Atualmente a definição de bacia hidrográfica vai muito além do simples conceito geográfico de uma área delimitada pelos pontos mais altos da região, onde parte da água da chuva escorre pelos divisores de água ou espigões e é drenada por um rio ou córrego. Uma bacia hidrográfica nos dias de hoje pode ser referida como uma unidade de planejamento estratégico. A gestão por bacias hidrográficas é um modelo onde a administração ultrapassa fronteiras políticas, possibilitando a otimização dos usos

múltiplos, promovendo técnicas inovadoras capazes de manter um meio sustentável (OLERIANO; DIAS, 2007).

No Estado de São Paulo, as bacias hidrográficas foram divididas em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) e este trabalho englobará o trecho final das Bacias Hidrográficas dos rios São José dos Dourados e do Baixo Tietê, localizadas na região noroeste do Estado, com atividades econômicas voltadas para os setores da agroindústria, com especial incremento da área cultivada com cana, eucalipto e seringueira, ainda que seja cultivado citros, café, banana, uva e agropecuária (SÃO PAULO, 2006).

Para Megda et al. (2006), a Bacia do São José dos Dourados não apresenta problemas de disponibilidade hídrica superficial em termos globais para atender a demanda, contudo, a bacia hidrográfica possui pontos críticos de processo erosivo. Segundo Silva; Herpin e Martinelli (2006), a Bacia do São José dos Dourados possui um solo extremamente frágil, o que pode acarretar no futuro em redução na disponibilidade hídrica e de acordo com Krieger (2007) essa indisponibilidade se torna mais evidente na estação seca, onde a necessidade da irrigação é maior devido ao baixo volume de chuvas e a vazão dos córregos é menor devido ao mau abastecimento do lençol freático, além da questão do uso intenso e desordenado da água subterrânea, ocasionando muitas vezes o rebaixamento do lençol freático, comprovada também por Franco e Hernandez (2009).

Hernandez e Franco (2013) fizeram a análise de disponibilidade hídrica em todas as 114 microbacias que compõem a bacia hidrográfica do Rio São José dos Dourados e usando técnicas de geoprocessamento concluíram que a expansão da área irrigada de forma sustentável depende de ações imediatas empreendidas no sentido de promover a maior permanência da água nas microbacias e isso deve ser feito com práticas de conservação do solo e barramento, enquanto que Franco, Hernandez e Lima (2013) fizeram a análise da fragilidade ambiental na microbacia do córrego do Coqueiro, uma das maiores e mais importantes microbacias e ainda Franco, Hernandez e Moraes (2013) usaram a análise multicritério para a definição de áreas prioritárias a restauração de Área de Preservação Permanente (APP) nesta mesma microbacia.

Vanzela (2008) apresenta uma proposta de adequação conservacionista na microbacia do córrego Três Barras no município de Marinópolis – SP, visando reter a água das chuvas na bacia hidrográfica.

2.1.2 Mudança no Uso e Ocupação do Solo

A grande pressão pelo uso de energias renováveis e menos poluentes, tem elevado a procura dos biocombustíveis, entre eles destaca-se o etanol produzido pela cana de açúcar, o que conseqüentemente provoca uma crescente demanda pela cultura que esta cada vez mais ocupando novas áreas (ALMEIDA et al., 2008).

O Estado de São Paulo é o maior produtor nacional de cana-de-açúcar, possuindo inúmeros municípios que têm grandes áreas ocupadas com essa cultura e com usinas instaladas (CAMARGO et al., 2008).

Segundo os dados do Instituto de Economia Agrícola-IEA (SÃO PAULO, 2013) em 2001 a região administrativa de Araçatuba (região administrativa em que estão inseridos os municípios da área de estudo) contava com uma área de 89.952 ha de cana-de-açúcar em fase de corte, com uma produção de 7.151.521 toneladas, sendo a produtividade de 79,5 toneladas/ha, já no ano de 2011 a área de corte passou para 259.616 ha, com uma produção de 20.681.102 toneladas e uma produtividade média de 79,7 toneladas/ha.

Esses dados demonstram que ao longo deste período, praticamente não houve aumento de produtividade nas áreas de cana-de-açúcar, demonstrando que o aumento de produção necessário para suprir a crescente demanda do etanol, vem sendo obtido por meio do aumento das áreas de cultivo. A cultura da cana-de-açúcar vem ocupando o espaço de outras culturas com menor rendimento financeiro, sendo a pecuária extensiva, principalmente as que se encontravam com pastagem degradada e foram utilizadas para o plantio de novas áreas de cana-de-açúcar.

De acordo com Castanho Filho et al. (2013) a crescente melhoria da técnica das diversas culturas, como melhoramento genético, novas variedades, inovações de manejo, nutrição, entre outras, levaram a um aumento na produtividade dessas culturas, levando a possibilidade de cultivos em áreas menores, ocorrendo assim a liberação de espaços que foram tomados pela cana-de-açúcar, que incorporou 67,0% das áreas, seguido por reflorestamento de eucalipto e pínus, pastagem cultivada e, em menor grau, pela soja, importante cultura de exportação. Sendo que, o oeste paulista absorveu cerca de 62,0% do que foi cedido por outras culturas e no norte foram as áreas de pastagem cultivada e laranja.

Segundo Camargo et al. (2008), de 2001 a 2006 o aumento pelo consumo de etanol impulsionou um crescimento de 37,4% (965.244 ha) da área cultivada com cana-de-açúcar no estado de São Paulo, sendo que deste total, 69,8% (673,600 ha) pertenciam as áreas de pastagem cultivada.

Essa troca, no uso e ocupação do solo moveram grandes mudanças, tanto nos parâmetros ambientais, onde Santos e Hernandez (2013), avaliando a qualidade da água no Córrego do Ipê no município de Ilha Solteira, destacam que a cultura da cana apresenta um melhor manejo do solo e menor interferência das áreas de preservação ambiental em relação às áreas de pastagem, demonstrando que em geral a cultura da cana apresenta um melhor manejo de conservação do solo do que as áreas de pastagem, o que reflete na preservação dos recursos hídricos.

Porém as alterações que essa mudança no uso e ocupação do solo pode causar vão muito além do manejo do solo, onde devido a grande diferença de porte e manejo entre a cana-de-açúcar e pastagem, pode ocorrer uma alteração no balanço de radiação e de energia, podendo certamente refletir em parâmetros como temperatura e evapotranspiração da cultura. Segundo André et al. (2010) é indispensável o conhecimento do balanço de radiação e suas variações para estudos de perda d'água para atmosfera e comportamento de vários elementos meteorológicos em solos vegetados.

2.1.3 Agricultura Irrigada

A utilização da água tem crescido em mais de duas vezes a taxa da população durante o século XX. Dois terços da população mundial, cerca de 5,5 bilhões de pessoas vivem em países que já em 2025 enfrentarão graves problemas para alcançar o crescimento econômico e social, dada a continuação do uso da água atual e as políticas de gestão (ONU, 1997).

A maioria dos países tem conhecimento dos próprios problemas de disponibilidade e uso dos recursos naturais; no entanto, há muitas dificuldades para a aplicação de tecnologias em grande escala, para resolver ou evitar problemas e para estabelecer programas de preservação desses recursos (PAZ et al., 2000).

Segundo a ONU (1997) a irrigação de culturas corresponde por cerca de 90% do consumo total dos recursos de água doce. Já Santos (1998) citado por Coelho (2005),

afirma que a agricultura irrigada consome cerca de 70% do total de água de qualidade usada, valor superior à quantidade consumida pelo setor industrial (21%) e pelo consumo doméstico (9%).

Apesar do grande consumo de água, a irrigação representa a maneira mais eficiente de aumento da produção de alimentos (PAZ et al., 2000). De acordo ainda com a ONU (1997) as áreas irrigadas contribuem com quase 40% da produção de alimentos representando apenas 17% das terras cultivadas, dados estes que são corroborados por Christofidis, (2002) citados por Coelho (2005), onde o autor afirma que apesar de corresponder a uma pequena parcela do total cultivado, a área irrigada mundial contribui com 42% da produção total, sendo que no Brasil, em particular, a área irrigada corresponde a 18% da área cultivada, mas contribui com 42% da produção total. Esta alta representação da produção total se justifica especialmente pela possibilidade de elevação da intensidade de uso do solo que, sob irrigação, produz até três cultivos por ano (PAZ et al., 2000).

Diante de tamanhos benefícios proporcionados pela irrigação, é cada vez mais frequente encontramos culturas onde antes jamais se pensava no uso da irrigação, aderindo esta técnica, entre elas a cultura da cana-de-açúcar. Pesquisas recentes vem demonstrando a viabilidade econômica da irrigação desta cultura, entre elas Dalri et al. (2008) comparando o cultivo de sequeiro da cana-de-açúcar com diferentes frequências de irrigação, chegaram a alcançar um aumento de 58% na produtividade com o uso da irrigação por gotejamento de subsuperfície.

Porém, de acordo com Neto et al. (2006) o incremento na produção do álcool e de açúcar são dependentes do manejo da irrigação combinados com a adubação adequada, da variedade, idade do corte e tipo de solo e clima. Dessa forma, fazer o manejo da irrigação corretamente torna-se determinante para que a irrigação proporcione condições ideais para a cultura manifestar o seu potencial máximo. Neste contexto o sensoriamento remoto tem sido uma interessante ferramenta no manejo da irrigação.

2.1.4 O Uso Do Sensoriamento Remoto na Agricultura

O uso do sensoriamento remoto através de imagens de satélite vem se demonstrando uma ferramenta muito interessante para a quantificação do balanço de energia. Essa ferramenta apresenta como grande vantagem o fato de poder ser utilizada não só em

larga escala espacial como temporal, permitindo o estudo ao longo do período desejado, podendo assim, verificar as alterações meso-climáticas causadas pela mudança do uso da terra ao longo dos anos. Desta forma imagens, de satélites de diferentes resoluções têm sido utilizadas para a obtenção de informações de áreas extensas (Compaoré et al., 2008).

Neste contexto, muitos trabalhos foram desenvolvidos nestes últimos anos, inclusive na própria região de estudo, utilizando o algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* - SEBAL (Teixeira et al., 2009; Teixeira, 2010; Hernandez et al., 2011), porém este algoritmo exige a presença de condições hidrológicas extremas dentro da cena, podendo levar a uma menor precisão dos dados, caso o operador não possua a prática necessária no momento da escolha dos pixels quente e frio, especialmente em época chuvosa, quando ocorrem valores de fluxo de calor latente similares na imagem. Dessa forma, optou-se para a realização deste trabalho a utilização do *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* - SAFER (TEIXEIRA, 2010; TEIXEIRA; HERNANDEZ; LOPES, 2012; TEIXEIRA et al, 2012), que possui uma aplicação mais simples, necessitando apenas dos dados de evapotranspiração de referência (ET_o), radiação global (R_g) e temperatura média do ar (T_a) obtidos através de estações agrometeorológicas para juntamente com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, chegando ao balanço de energia incluindo a evapotranspiração atual (ET_a) que pode ser utilizada como ferramenta no auxílio do manejo da irrigação em diferentes culturas, ao definir corretamente a relação ET_a/ET_o ou coeficiente de cultura atual.

2.1.5 Balanço de Radiação e de Energia

A radiação eletromagnética emitida pelo Sol e que chega a superfície da terra, é constituída predominantemente de radiação de ondas curtas, essa radiação é a responsável por promover a iluminação e o aquecimento do planeta (BÍSCARO, 2007).

O total de energia que atinge o corpo da atmosfera terrestre é denominado de constante solar e varia de 1.365 a 1369 Wm⁻², tendo uma variação de 0,3% a cada 11 anos. No entanto, a constante solar varia de acordo com a época do ano e com a latitude, devido a inclinação dos raios solares. Entretanto, quando a radiação solar penetra na atmosfera terrestre, esta sofre atenuações devido a reflexão, espalhamento e absorção

causados pelos componentes atmosféricos como gases, água e nuvens (MOREIRA, 2011).

Quando a radiação é refletida pelas nuvens ou outros componentes atmosféricos antes de atingir a superfície da terra, esta radiação passa a ser chamada de radiação difusa. Assim a radiação solar atmosférica ou global que atinge a superfície ($R_s\downarrow$) é composta pela radiação direta (R_d) e pela radiação difusa (R_{df}).

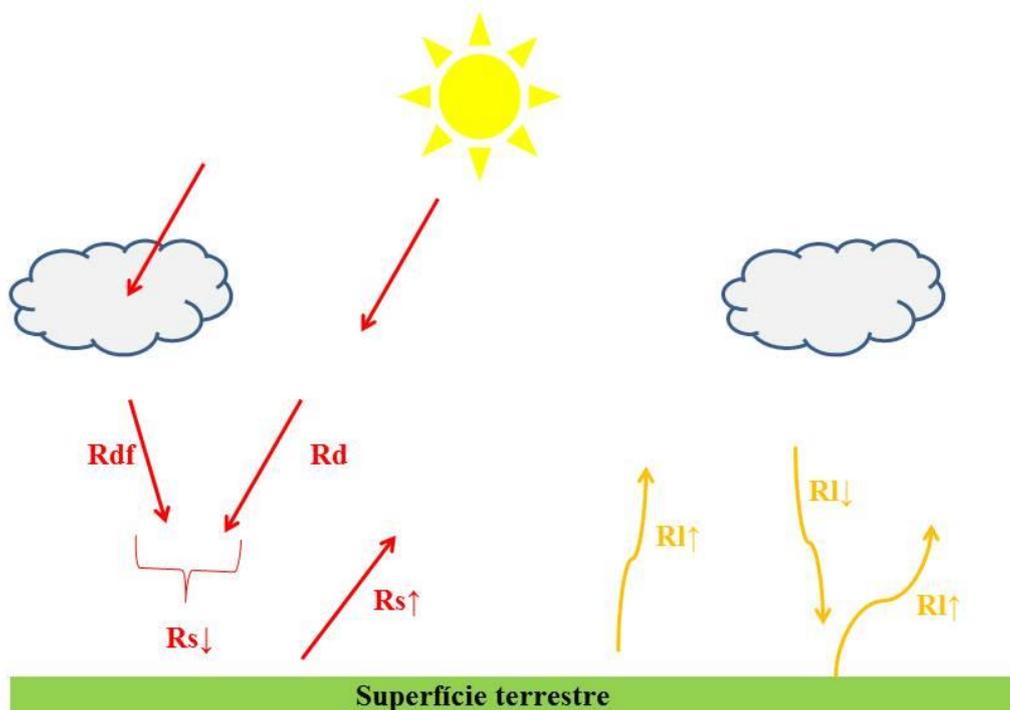
$$R_s = R_d + R_{df} \quad (1)$$

Nem toda radiação de ondas curtas que chega a superfície terrestre ($R_s\downarrow$) é absorvida por esta superfície, parte desta radiação é refletida de volta a atmosfera ($R_s\uparrow$). Esse balanço entre a radiação de onda curta que incide e a que é refletida, pode ser chamado de balanço de ondas curtas (Boc).

A terra, assim como qualquer corpo que possua temperatura diferente de 0°K também emite a sua própria radiação, neste caso predominando a radiação de ondas longas ($R_l\uparrow$). Assim como a terra, a atmosfera também produz uma radiação de ondas longas chamadas de contra-radiação que possui o sentido oposto a radiação terrestre e que é incide na superfície terrestre ($R_l\downarrow$), porém parte dessa radiação que incide sobre a superfície também é refletida ($R_l\uparrow$). Assim, podemos denominar este balanço entre radiação de ondas longas que emitidas (R_{em}) e radiação de ondas longas incidentes (R_{inc}) de balanço de ondas longas (Bol) (BÍSCARO, 2007; MESQUITA, 2012).

Dessa forma, a soma dos balanços de radiação de ondas curtas (Boc) e o balanço de radiação de ondas longas (Bol) constituem o balanço de radiação (Br) como pode-se observar na Figura 1.

Figura 1 - Balanço de radiação



Fonte: Produção do próprio autor

Muitos trabalhos vem sendo realizados buscando observar o balanço de radiação e de energia em diversas culturas, como por exemplo Silva et al. (2011) que avaliaram as variações nas magnitudes e nas partições dos componentes do balanço de radiação e de energia, obtidos durante o período de crescimento da cana-de-açúcar irrigada em Juazeiro, BA. Teixeira, Hernandez e Lopes (2012) utilizaram imagens Landsat e dados de estações agrometeorológicas para quantificar o balanço de energia no perímetro irrigado Nilo Coelho na região do semiárido nordestino.

Dentro do balanço de radiação e de energia podemos determinar diversos parâmetros que podem ser utilizados tanto de forma isolada quanto em suas relações para se avaliar o balanço de radiação e energia de acordo com a sua interação com o uso e ocupação do solo. Entre esses parâmetros, seguem os que foram utilizados neste trabalho.

2.1.5.1 Evapotranspiração de Referência (ET_o), Evapotranspiração Atual (ET_a) e relação ET_a/ET_o

Segundo Mendonça et al. (2003) a evapotranspiração resume-se ao processo inverso da precipitação, pois é a somatória da perda de água através da evaporação do solo e da transpiração das plantas, sendo controlada pelo balanço de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas.

O conhecimento da evapotranspiração de referência (ET_o) é de grande importância na estimativa da necessidade de irrigação das culturas, sendo um dos primeiros fatores que deve ser conhecido para um eficiente manejo racional dos recursos hídricos (Back, 2007).

Para Henrique e Dantas (2007) a partir dos dados da evapotranspiração de referência é possível avaliar a severidade, distribuição e frequência dos déficits hídricos, auxiliando na elaboração de projetos e manejos da irrigação e drenagem.

Entre os diversos métodos utilizados para o cálculo da ET_o, o método de Penman-Monteith, descrito por Allen et al. (1998), vem sendo aceito por pesquisadores em diversos países do mundo como o método padrão para o cálculo da Evapotranspiração de Referência (Smith et al., 1991). Este método é estimado através de dados provenientes de estação agrometeorológicas utilizando para tanto uma cobertura vegetal que apresente as mesmas características de estádio ao longo do ano, apresentando-se sempre verde e sem restrições hídricas, sendo alfafa ou grama batatais as coberturas utilizadas para abrigar os sensores agrometeorológicos.

Já a Evapotranspiração Atual (ET_a) representa a evapotranspiração atual de cada cobertura do solo, podendo ou não estar com déficit hídrico, o que restringe a evapotranspiração da cultura. Em casos que a cultura apresenta total disponibilidade hídrica, através da relação ET_a/ET_o chega-se ao valor do coeficiente da cultura (K_c) que expressa a razão entre a ET_o e a ET_a e que é uma das principais dificuldades no manejo da irrigação, pois muitas vezes não se tem o valor de K_c para determinadas culturas obtidos para a região e para a variedade plantada, uma vez que a demanda hídrica da planta varia conforme a radiação solar incidente no local, tipo de solo, variedade e idade da planta (BARBOZA JÚNIOR et al., 2008).

Porém, como neste trabalho não é possível saber precisamente se há ou não restrição hídrica, não se pode afirmar que esta relação represente o K_c, por isso este valor será tratado como ET_a/ET_o.

2.1.5.2 Albedo de Superfície

A superfície terrestre possui a capacidade de absorver a radiação solar incidente, entretanto a superfície não absorve perfeitamente essa energia, uma fração da mesma é refletida novamente para a atmosfera. Essa característica física que determina a capacidade refletir a radiação solar é denominada de albedo (MESQUITA, 2012).

Fisicamente, o albedo é inversamente proporcional a capacidade que uma superfície tem de absorver a radiação solar. Deste modo, quando uma superfície possui um albedo elevado, uma grande parcela da R_s é refletida de volta para atmosfera (MESQUITA, 2012).

Giongo et al. (2010) buscando estimar dados de albedo à superfície terrestre usando o sensor Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT 5 em áreas de cana-de-açúcar e de cerrado em uma região do município de Santa Rita do Passa Quatro, Estado de São Paulo, encontraram valores de albedo na área de cana entre 13,5 a 23,1% para o período das imagens.

Já Esteves et al. (2012) a partir dos dados gerados por piranômetros, instalados em uma estação micrometeorológica em uma área de 13ha, em cultivo comercial em Campos dos Goytacazes, norte fluminense durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar; obtiveram albedo médio para a fase de estabelecimento da cana-de-açúcar de $0,20 \pm 0,03$; para o perfilhamento, de $0,26 \pm 0,03$; para a fase de desenvolvimento dos colmos de $0,28 \pm 0,03$ e para a fase de maturação da cana-de-açúcar de $0,26 \pm 0,02$, sendo o valor médio do albedo para todo o ciclo da cultura de $0,26 \pm 0,04$.

2.1.5.3 Saldo de Radiação (R_n)

O saldo de radiação (R_n) ou radiação líquida representa a energia real disponível na superfície, sendo calculada extraindo toda a radiação que sai da superfície de toda a radiação que chega (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2002). Ou seja, é representa toda radiação que é absorvida pela superfície no balanço de radiação (Br) como demonstrado na equação 2 a seguir:

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} - (1 - \epsilon_o)R_{l\downarrow} \quad (2)$$

Onde; $R_{s\downarrow}$ é a radiação de ondas curtas incidentes (W/m^2), α é o albedo da superfície (dimensão), $R_{l\downarrow}$ é a radiação de ondas longas de entrada (W/m^2), $R_{l\uparrow}$ é a radiação de ondas longas de saída (W/m^2), e ϵ_o é a emissividade térmica da superfície (sem dimensão).

2.1.5.4 Radiação de Onda Curta Incidente ($R_{g\downarrow}$) e Radiação de Onda Curta Refletida ($R_{r\uparrow}$), Relação ($R_{s\uparrow}/R_{s\downarrow}$) e Relação ($R_n/R_{s\downarrow}$)

Como explicado anteriormente, a radiação de onda curta incidente ($R_{g\downarrow}$) é proveniente radiação eletromagnética emitida pelo Sol e que chega a superfície da terra, sendo composta pela radiação de ondas curtas direta (R_d) e pela radiação de ondas curtas difusa (R_{df}). Já a radiação de onda curta refletida ($R_{r\uparrow}$) corresponde a parte da $R_{g\downarrow}$ que ao incidir sobre a superfície não é absorvida e acaba sendo refletida de volta para a atmosfera.

Analisando esta relação, dividindo $R_{s\uparrow}/R_{s\downarrow}$ pode-se obter a proporção de radiação de ondas curtas que é refletida para a atmosfera. Teixeira, Hernandez e Lopes (2012), quantificando o balanço de energia em dez imagens, encontraram valores médios de $R_{g\downarrow}$ de $22,8 MJ m^{-2} d^{-1}$ e de $4,2 MJ m^{-2} d^{-1}$ para $R_{r\uparrow}$.

Através da relação $R_n/R_{s\downarrow}$ é possível se observar a proporção de $R_{s\downarrow}$ que esta presente em R_n , onde Teixeira, Hernandez e Lopes (2012) destacam que os valores de R_n são fortemente dependentes de $R_{s\downarrow}$. Já Pezzopane, Pedro Júnior e Gallo (2005) definem esta relação como uma importante informação relacionada com o balanço de radiação em cultivos agrícolas.

2.1.5.5 Radiação de Onda Longa Incidente ($R_{l\downarrow}$) e Radiação de Onda Longa Refletida ($R_{l\uparrow}$)

Como informado no tópico 2.5., qualquer corpo que possua temperatura diferente de $0^\circ K$ emite a sua própria radiação, neste caso predominando a radiação de ondas longas ($R_{l\uparrow}$). Sendo assim, no balanço de radiação e de energia, foram avaliadas tanto a radiação de ondas longas emitida pela superfície da terra em sentido a atmosfera ($R_{l\uparrow}$), quando a radiação de ondas longas emitida pelos gases presentes na atmosfera em sentido a superfície ($R_{l\downarrow}$)

Segundo Von Randow e Alvalá (2006), a radiação de ondas longas emitidas pela atmosfera é o componente do balanço de radiação mais difícil de ser medido, pois os instrumentos utilizados para a sua medição, acabam emitindo radiação em comprimentos de onda e intensidade comparáveis àquelas da suposta medida, o que interfere no resultado. Segundo o mesmo autor, o fluxo de radiação de onda longa proveniente da atmosfera é um importante componente da troca de radiação na superfície, e esta, por sua vez, é um importante componente do balanço de energia.

2.1.5.6 Relações H/R_n , $\lambda E/R_n$ e Temperatura de Superfície.

O fluxo de calor sensível (λE) é a fração de energia do saldo de radiação que é utilizada na evapotranspiração da água, sendo que quanto maior for a quantidade de água disponível na superfície, maior será a proporção do saldo de radiação utilizado na evapotranspiração da água. Já a fração do saldo de radiação que não é utilizada na evapotranspiração é convertida em fluxo de calor sensível (H), sendo esta energia utilizada no aquecimento do solo, do ar e das plantas (FRANCO et al., 2013).

Dessa forma, quanto menor a presença de água na superfície, menor será o valor de λE e maior o valor de H , o que conseqüentemente aumenta a temperatura de superfície (T_s). Já pelas relações H/R_n e $\lambda E/R_n$ é possível se determinar a proporção de R_n que esta sendo utilizado como λE e H , trabalho este que foi feito por diversos autores, entre eles Cunha, Escobedo e Klosowski (2002) encontraram valores de $\lambda E/R_n$ iguais a 0,88 para cultivo protegido de pimentão e 0,98 para cultivo de campo. Para H/R_n o valor encontrado foi respectivamente 0,10 e -0,04, dados que demonstram que havia uma boa disponibilidade de água na cultura.

2.1.5.7 NDVI

Os índices de vegetação são utilizados como indicadores numéricos que usam as bandas visíveis e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, e são adotados para analisar a presença de vegetação através de medidas de sensoriamento remoto.

Segundo Meneses e Almeida (2012), na vegetação, a principal banda de absorção está centrada na região visível da luz vermelha (650 nm), que nas imagens do sensor

ETM do Landsat equivale à banda 3, situada de 630 nm a 690 nm. Já a região de maior reflectância esta na faixa do infravermelho próximo, que se situa a banda 4, nos comprimentos de onda de 760 nm a 900 nm.

Ainda segundo os mesmos autores, os valores de NDVI envolvem a diferença e a soma entre estas duas bandas do infravermelho próximo e do vermelho, chegando a valores computados que variam de -1 a +1. A vantagem do NDVI sobre outros índices de vegetação como o RVI (Ratio Vegetation Index) é que ele tende a ser linearmente mais proporcional à biomassa, também é mais apropriado quando se pretende fazer comparações ao longo do tempo de uma mesma área, pois é esperado de ser menos influenciado pelas variações das condições atmosféricas

Inúmeros trabalhos são atualmente realizados relacionando os dados de NDVI com diversos parâmetros como cobertura do solo, atividade fotossintética da planta, água de superfície, índice de área foliar e a quantidade de biomassa. Entre eles Lucas e Schuler (2007) fazendo uma análise espaço-temporal do NDVI na cultura da cana-de-açúcar, encontraram um aumento no valor de NDVI acompanhando o ganho de biomassa da cultura da cana-de-açúcar, com diminuição do seu valor conforme se inicia o estágio de maturação da cultura.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da Área de Estudo

O balanço de radiação e energia foi realizado nos municípios de Ilha Solteira, Pereira Barreto, Sud Mennucci, Suzanápolis e parte do município de Itapura, na região Noroeste do Estado de São Paulo, perfazendo uma área de 280.591 hectares (Tabela 1), sendo a maior proporção ocupada pelo município de Pereira Barreto que ocupa 34,9% da região de estudo.

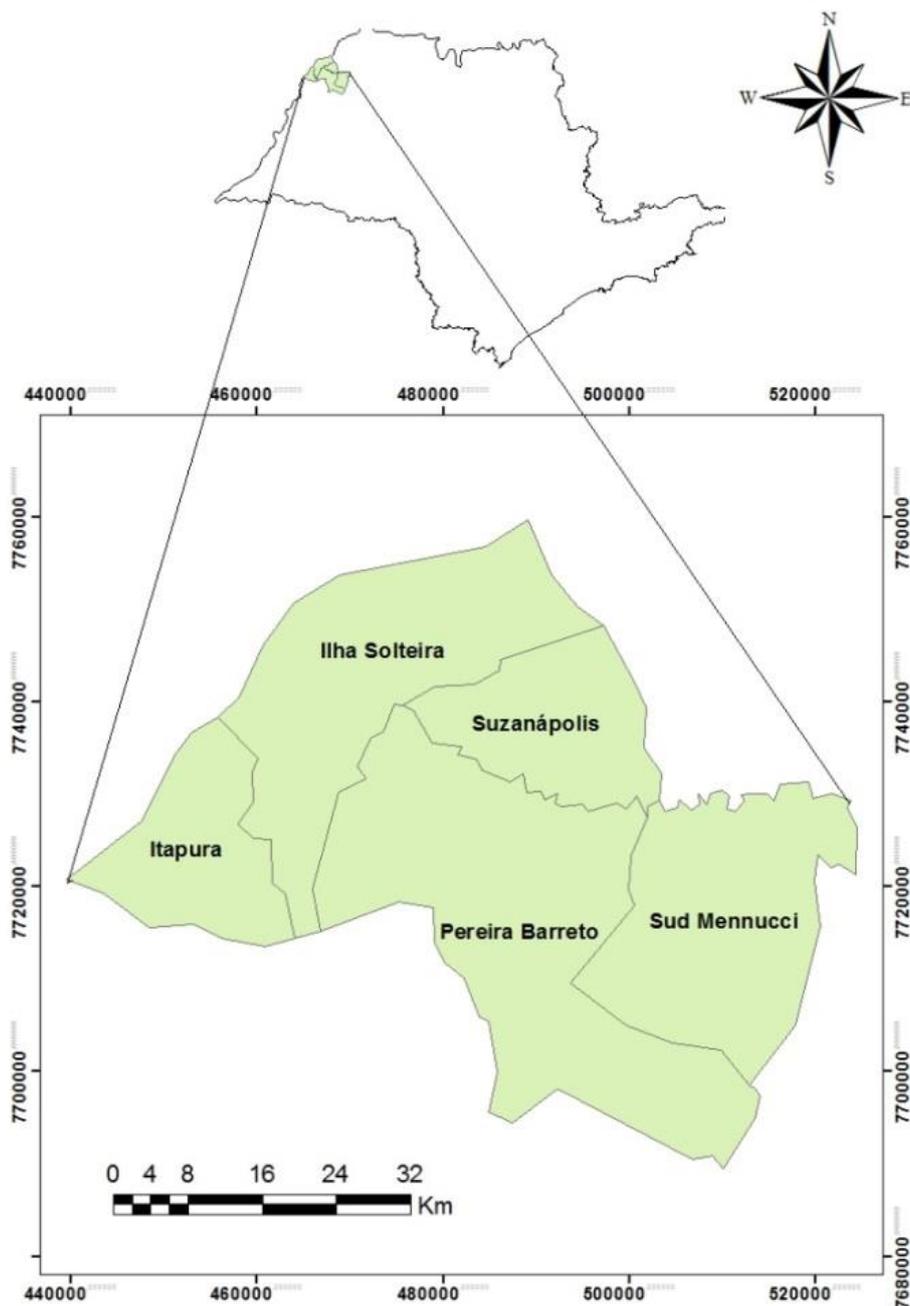
Tabela 1 - Áreas dos municípios que compoem a região de estudo

Municípios	Área (ha)	% em relação a Área Total
Ilha Solteira	65.937	23,5
Itapura	24.803	8,8
Pereira Barreto	97.996	34,9
Sud Mennucci	59.066	21,1
Suzanápolis	32.789	11,7
Área Total	280.591	-

Fonte: Produção do próprio autor

A região de estudo (Figura 2) apresenta déficits hídricos prolongados ao longo de oito meses por ano e a maior taxa de evapotranspiração de referência (ET_0) do Estado de São Paulo, com suscetibilidade a veranicos (DAMIÃO et al. 2010; SANTOS; HERNANDEZ; ROSSETTI, 2010; HERNANDEZ; LEMOS FILHO; BUZETTI, 1995; HERNANDEZ et al., 2003), ainda que tenha uma precipitação anual média histórica (1967-1994) de 1232 mm (HERNANDEZ; LEMOS FILHO; BUZETTI, 1995) ou de 1.354 mm (DAMIÃO et al, 2010) no período de 2000 a 2010. Além disso, região apresenta áreas urbanas próximas as zonas rurais, elevando a importância do monitoramento da evolução temporal e do agravamento dos efeitos da ilha de calor urbano.

Figura 2 - Localização dos municípios estudados no noroeste paulista



Fonte: Produção do próprio autor

2.2.2 Aquisição de Imagens e Dados Agrometeorológicos

Para a realização do balanço de radiação e energia foram utilizadas duas imagens por ano para o período de 2001 a 2004 e de 2008 a 2011, totalizando dezesseis imagens *Landsat Thematic Mapper* TM-5, com órbita 222 e ponto 74, possuindo cada imagem

uma área de 34.225 Km², adquiridas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (<http://www.inpe.br>) em condições de céu claro, favorecendo estudos de balanço de radiação e energia através das imagens de satélite, pela ausência de nuvens.

As áreas de cana-de-açúcar foram identificadas e quantificadas no período de 2006 a 2011 por meio dos dados em formato *shapefile* fornecidos pelo CANASAT (RUDORFF et al., 2010; ADAMI et al., 2012).

As áreas dos demais anos foram identificadas através de uma composição de bandas do satélite Landsat-TM 5, com combinação de cores das bandas 3, 2, e 1 no espaço RGB, respectivamente, chegando assim na área de interesse dentro da região de estudo. Já os valores das áreas total de cultivo, área de expansão e área de reforma, foram obtidas no período de 2003 a 2011 também pelo site do CANASAT, sendo os dados de área total cultivada e área de expansão, determinados pela delimitação visual para os anos de 2001 e 2002.

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), a radiação global (R_g) e temperatura média do ar (T_a) foram obtidas através das estações agrometeorológicas automáticas localizadas no noroeste paulista, nos municípios de Ilha Solteira e Marinópolis (UNESP, 2013). Em seguida, os dados foram interpolados pelo método Moving Average e posteriormente inseridas no algoritmo utilizado para obtenção da evapotranspiração atual (ET_a) e no balanço de radiação e energia.

2.2.3 Processamento

Antes da obtenção da estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto as imagens são processadas, com correções geométricas, calibrações radiométricas e informações biofísicas para o cálculo do balanço de energia.

Para o geoprocessamento das informações foi utilizado o software ILWIS (*Integrated Land Water Information System*) que na função script possibilitou os cálculos dos dados no formato matricial (raster).

As primeiras etapas do processamento estão de acordo com Teixeira (2010), Teixeira; Hernandez e Lopes (2012) e Teixeira et al. (2013). Nos próximos itens são apresentados as equações com detalhamento das etapas.

2.2.3.1 Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância

Inicialmente correções atmosféricas foram realizadas com posterior conversão dos valores digitais em radiância espectral (CHANDER; MARKHAM, 2003) para cada banda por meio da equação 3, sendo que a Radiância (L_λ) é a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica, sendo medida em watts por metro quadrado por esterradiano ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$).

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) Q_{cal} + L_{MIN} \quad (3)$$

Onde:

L_{MAX} = radiância máxima ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$)

L_{MIN} = radiância mínima ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$)

Q_{cal} = intensidade do pixel (ND), número inteiro variando de 0 a 255.

Tabela 2 - Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).

Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
		a	b	
1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,52	193,0	1983
2 (verde)	0,52 – 0,60	-2,84	365,0	1796
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	-1,17	264,0	1536
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,79	-1,51	221,0	1031
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,37	30,2	220,0
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	1,2378	15,3032	-
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	-0,15	16,5	83,44

Fonte: modificado de Chandler e Markham, 2003.

2.2.3.2 Cálculo de reflectância

Para cada banda é calculada então a reflectância (ρ_{λ}) a partir dos valores de radiância obtidos na etapa anterior, sendo a reflectância o processo pelo qual a radiação “resvala” num objeto como o topo de uma nuvem, um corpo d’água, ou um solo exposto. Equação 4:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda} * \cos Z * E_0} \quad (4)$$

Sendo:

L_{λ} = radiância de cada banda

$ESUN_{\lambda}$ = irradiância Espectral no Topo da Atmosfera (Tabela 2).

$\cos Z$ = ângulo zenital

E_0 = ângulo diário

Onde E_0 é definido por:

$$E_0 = 1,000110 + 0,0342221 \cos(da) + 0,001280 \sin(da) + 0,000719 \cos(2 * da) + 0,000077 \sin(2 * da) \quad (5)$$

Sendo:

da = ângulo diário

Onde da é definido por:

$$da = (d_n - 1) \frac{2\pi}{365} \quad (6)$$

Sendo

d_n = dia Juliano da imagem

2.2.3.3 Albedo no topo da atmosfera

A obtenção do albedo planetário foi feita pela equação abaixo:

$$\alpha_{top} = \sum(\omega_{\lambda} * \rho_{\lambda}) \quad (7)$$

Onde:

ρ_{λ} = reflectância

ω_λ = coeficiente para cada banda

Sendo ω_λ obtido pela equação 6:

$$\omega_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \quad (8)$$

Tabela 3 - Coeficientes para o cálculo do albedo planetario para cada banda do Landsat TM5.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
Landsat TM 5	0,298	0,270	0,231	0,155	0,033	-	0,013

Fonte: Dados do próprio autor

2.2.3.4 Albedo de superfície

As informações sobre o albedo de superfície e temperatura de superfície foram obtidos pelas equações 7 e 8 utilizando os coeficientes de Teixeira (2010):

$$\alpha_o = 0,7 * \alpha_{top} + 0,06 \quad (9)$$

Onde:

α_{top} = Albedo no topo da atmosfera, obtido na equação 7.

2.2.3.5 Temperatura de superfície

Os fundamentos do sensoriamento remoto termal estão embasados na Termodinâmica Clássica e na Física Quântica. O problema de se estimar a temperatura de um corpo por meio de sensores remotos é solucionado utilizando as Leis de Kirchhoff e a Lei de Planck. A base fundamental do sensoriamento remoto do infravermelho termal é que toda superfície emite radiação, e sua intensidade depende da temperatura da superfície estudada.

Para elaborar a carta de temperatura da superfície, utilizou-se a imagem do canal do infravermelho termal (faixa espectral de 10,4 a 12,5 μm) do sensor TM do satélite Landsat - 5, com resolução espacial de 60 metros.

A temperatura de superfície foi calculada pela seguinte equação:

$$T_0 = 1,11 * T_{bright} - 31,89 \quad (10)$$

Onde T_{bright} é obtido pela equação 11:

$$T_{bright} = \frac{1260,56}{\ln\left(\frac{607,76}{L_6+1}\right)} \quad (11)$$

Sendo:

L_6 = radiância (L_λ) da banda 6

2.2.3.6 Índice de vegetação de diferença normalizada-NDVI

Em seguida foram calculados os dados de NDVI pela seguinte equação:

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)} \quad (12)$$

Sendo:

ρ_4 = reflectância da banda 4 – infravermelho próximo

ρ_3 = reflectância da banda 3 – banda no vermelho

2.2.3.7 Evapotranspiração em escala regional utilizando o algoritmo SAFER

Posteriormente os dados de albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_0) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), foram utilizados para se calcular os valores instantâneos da relação ET_a/ET_0 (Equação 13).

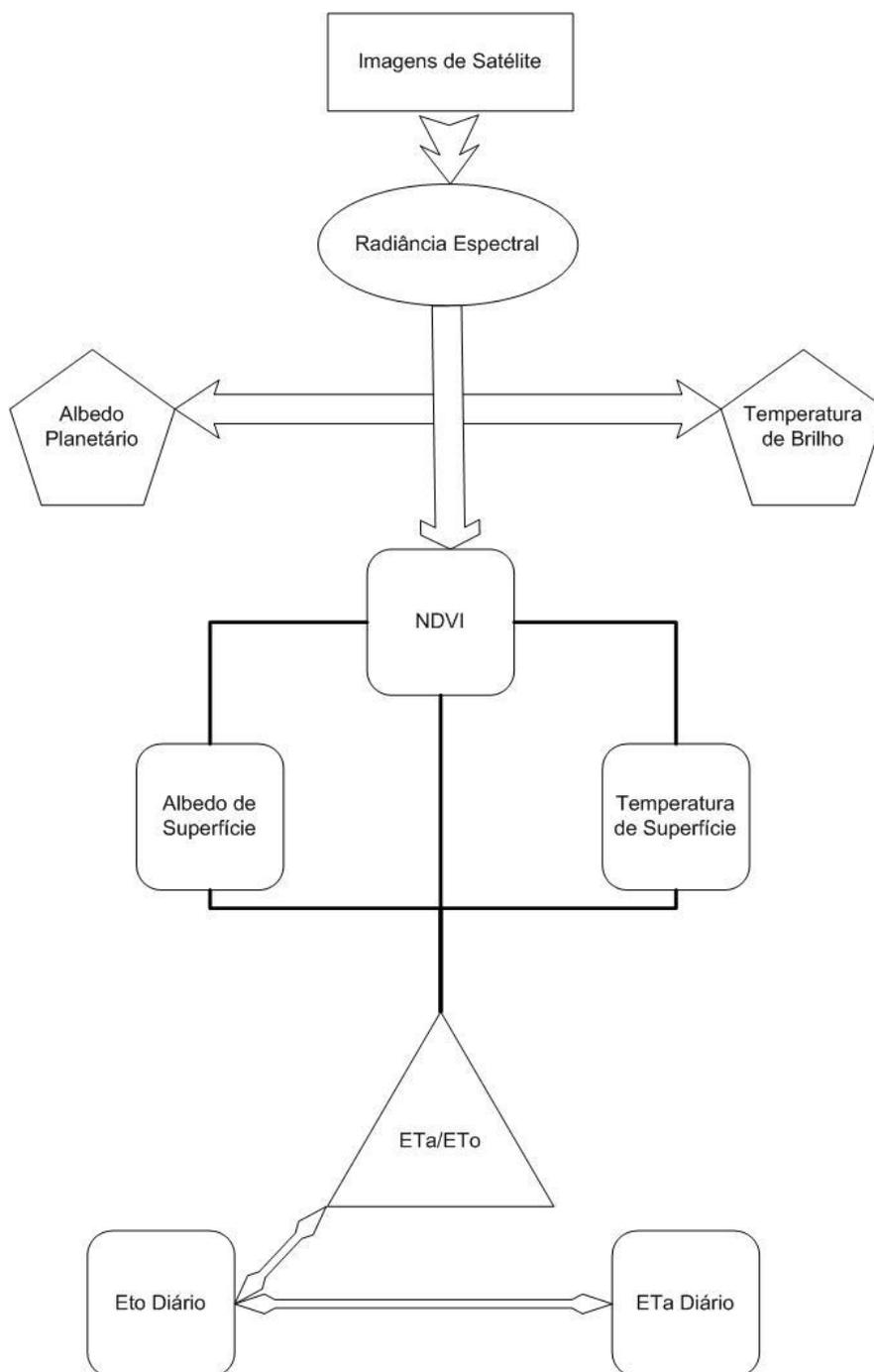
Onde para o coeficiente “a” foi utilizado o valor de 1,0 (HERNANDEZ et al., 2012; TEIXEIRA et al., 2013) e o coeficiente “b” foi obtido por Teixeira (2010) correspondendo ao valor de -0,008.

$$\frac{ET_a}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (13)$$

Em seguida os valores instantâneos dessa relação são então multiplicados pelos valores diários da ET_0 , chegando assim à ET_a , como demonstrado na equação 12:

$$ET_a = \frac{ET_a}{ET_0} * ET_0 \quad (14)$$

Figura 3 - Fluxograma esquemático para o cálculo da evapotranspiração real por meio do algoritmo SAFER



Fonte: Modificado de Teixeira (2010).

2.2.3.8 Cálculo do Balanço de Energia

Dentro do cálculo do balanço de energia, o albedo foi calculado pela seguinte fórmula:

$$Alb_{24} = 1,0223 * \alpha_o + 0,0149 \quad (15)$$

Já a radiação global incidente ($Rg\downarrow$) foi obtida nos piranômetros nas estações agrometeorológicas, enquanto a radiação de onda curta refletida pela superfície ($Rr\uparrow$) foi calculada pela seguinte equação:

$$Rr\uparrow = Rg\downarrow * Alb_{24} \quad (16)$$

Onde $Rg\downarrow$ = radiação de onda curta incidente em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$

A radiação de onda longa incidente ($Rl\downarrow$) foi calculada pela equação de Stefan-Boltzman, utilizando-se os valores de T_a .

$$Rl\downarrow = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (17)$$

Onde:

σ = é a constante de Stefan-Boltz

ε = o poder de emissividade do corpo

T = é temperatura obtida por meio das estações agrometeorológicas em K

Enquanto $Rl\downarrow$ foi obtido pela lei de Stefan-Boltzman, o valor de $Rl\uparrow$ foi encontrado por meio da diferença entre radiações de ondas curtas, a radiação de onda longa emitida pela atmosfera e o saldo de radiação, como demonstrado pela equação 18.

$$Rl\uparrow = (Rg\downarrow - Rr\uparrow) + (Rl\downarrow - Rn) \quad (18)$$

Já os valores de Rn foram obtidos pela equação 19

$$n = (1 - \alpha_o)Rg\downarrow - a\tau_{sw} \quad (19)$$

Onde $Rg \downarrow$ em W/m^2 ; a é um coeficiente de regressão entre o saldo de radiação de ondas longas e transmissividade atmosférica de ondas curtas (τ_{sw}), sendo obtido através da equação a seguir:

$$a = bT_a - c \quad (20)$$

Sendo que “b” e “c” são coeficientes de regressão obtidos por Teixeira et al. (2008a) para condições do semiárido brasileiro, sendo respectivamente 6,99 e 39,93. Os valores de T_a correspondem a interpolação dos dados de temperatura média do ar.

Os valores de fluxo de calor latente (λE) foram obtidos através da conversão da ET_a em unidades de energia, posteriormente os valores de H (fluxo de calor sensível) foram determinados como resíduo do balanço de energia, assumindo-se para isso que os valores do fluxo de calor no solo (G) correspondem a 0 para o período de 24 horas:

$$H = R_n - \lambda E \quad (21)$$

2.2.4 Avaliação dos Resultados Obtidos

Após a obtenção das imagens, estas foram importadas no software Arc Gis@10, onde foram obtidos os valores médios dos parâmetros biofísicos que compõem o balanço de energia para a área total de estudo. A partir daí os valores médios foram agrupados em dois períodos, sendo o primeiro período de 2001 a 2004 e o segundo de 2008 a 2011, onde os valores foram avaliados perante o comportamento dos valores médios e extremos.

Para avaliar a existência de diferença estatística entre as médias, por meio de gráficos de erro padrão da média, adotando-se o critério de Gravetter e Wallnau (1995) diferenciando estatisticamente os tratamentos, pela ausência de sobreposição dos limites superior e inferior dos valores da média \pm erro padrão, sendo neste caso utilizado um erro padrão de ± 2 .

Os parâmetros que apresentaram diferença estatística tiveram os seus valores médios extraídos para algumas classes de uso e ocupação do solo por meio da delimitação visual em composição natural de alguns polígonos aleatórios ao longo da área de estudo. Essas classes delimitadas foram a cultura da “Cana-de-Açúcar”, onde de dentro

dessas áreas foram extraídos os valores médios de áreas pertencentes ao cultivo da cana que no presente momento se encontravam ou com a cana colhida ou com o solo exposto, classe essa que foi denominada como “Cana Colhida”, áreas onde a cana estava cobrindo totalmente o solo, denominando-se essa classe como “Cana Verde”, foram ainda selecionadas áreas de “Culturas Anuais Irrigadas” áreas estas identificadas nas áreas de pivôs centrais e áreas de pastagens.

Os valores médios obtidos em cada classe foram relacionados com o valor médio de toda a área de estudo, demonstrando através do maior valor de R^2 qual classe de uso e ocupação do solo apresentou maior influência no valor médio de toda a área.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Área de Cana-de-Açúcar

Na Tabela 4 encontram-se os dados de áreas cultivadas nos municípios que compõem a área de estudo. Pode-se observar que no ano de 2001 apenas os municípios de Sud Mennucci e Suzanápolis apresentavam área com a cultura da cana-de-açúcar, sendo respectivamente 5107 e 2083 hectares, apenas no ano de 2004, todos os municípios passaram a apresentar o cultivo da cana, destacando-se entre eles os municípios de Pereira Barreto e Sud Mennucci, que apresentaram para todo o período avaliado as maiores áreas com cana, sendo Sud Mennucci ultrapassado apenas em 2011 pelo município de Ilha Solteira.

Tal fato se deve principalmente pela presença de usinas nesses municípios, onde o município de Pereira Barreto possui a “Usina Santa Adélia” que começou a funcionar em 2006, mas teve a sua construção iniciada em 2004 (USINA SANTA ADÉLIA, 2013). Já o município de Sud Mennucci conta com a “Usina Santa Adélia Pioneiros” a qual surgiu em 2011 após a fusão da Usina Santa Adélia com a Pioneiros Bioenergia S/A, porém esta já existia no município desde 1979 (JORNAL CANA, 2009).

Essa diferença de tempo de funcionamento entre as usinas justifica o fato de até o ano de 2007 a maior produção ter sido encontrada em Sud Mennucci, sendo ultrapassada já em 2008 por Pereira Barreto, ano posterior ao início do funcionamento de sua usina.

Já o município de Suzanápolis apesar de ter a inauguração de sua usina “Vale do Paraná” realizada em 2008 (JORNAL DIÁRIO DE FATO, 2008), já apresenta em 2001 áreas com a cultura da cana-de-açúcar, permanecendo até 2006 como a segunda maior produtora de cana, sendo ultrapassada em 2007 por Pereira Barreto, em 2008 por Ilha Solteira e em 2009 por Itapura. Dessa forma em 2011 os municípios com maior quantidade de área de cana-de-açúcar eram respectivamente Pereira Barreto, Ilha Solteira, Sud Mennucci, Itapura e Suzanápolis.

Na Tabela 5 encontra-se a expansão anual das áreas de cultivo de cana-de-açúcar para cada municípios, observando que o ano de 2001 aparece com expansão de 0 hectares mesmo para os municípios que já possuíam cana, pois para este trabalho não foram consideradas as áreas de cana de 2000, dessa forma o ano de 2001 consta como crescimento 0.

Tabela 4 - Área total de cultivo da cana-de-açúcar no noroeste paulista

Ano	Área Total Cultivada (ha)				
	Sud Mennucci	Ilha Solteira	Pereira Barreto	Suzanápolis	Itapura
2001	5107	0	0	2083	0
2002	5357	0	815	3284	0
2003	7675	0	1067	3244	0
2004	8108	68	1682	3759	792
2005	8612	502	1818	4885	804
2006	8980	598	2235	4925	804
2007	10807	3347	8688	6764	3717
2008	14587	10985	17601	7798	7570
2009	15648	14874	21569	6832	9549
2010	15460	15374	23282	7006	10250
2011	15025	16266	23901	6768	10309

Fonte: Dados do CANASAT, Rudorff et al. (2010) e Adami et al. (2012)

Para o município de Sud Mennucci o ano de 2008 foi o que apresentou a maior expansão do cultivo com 3780 ha, sendo que para os anos de 2010 e 2011 apresentaram uma redução de área plantada de 188 e 435 hectares respectivamente. Já o município de Ilha Solteira teve o menor crescimento do cultivo em 2004 com 68 hectares, sendo este o ano em que se iniciou o cultivo de cana-de-açúcar no município, posteriormente o segundo menor crescimento foi observado em 2006, com apenas 96 hectares, enquanto que o ano de 2008 o crescimento da área cultivada foi de 7638 ha.

Para o município de Pereira Barreto a maior área de expansão foi observada em 2008, com 8913 ha, sendo o ano de 2005 o ano de menor expansão, com apenas 136 ha. Já o município de Suzanápolis apresentou oscilou com diminuição da área plantada nos anos de 2003, 2009 e 2011, sendo a maior diminuição observada em 2009, com uma redução de 966 ha, enquanto em 2007 foi obtido o maior crescimento da cultura, com 1839 ha. ao longo do período.

O município de Itapura, teve o cultivo de cana-de-açúcar iniciado em 2004, com um crescimento de apenas 12 ha no ano seguinte e em 2006 não apresentou nenhum crescimento, voltando a expandir significativamente no ano posterior e atingindo em 2008 a maior área de expansão observada com 3853 ha. Porém, já no ano seguinte voltou a apresentar diminuição na expansão do cultivo, chegando em 2011 com uma expansão de 701 ha.

Tabela 5 - Área anual de expansão da cultura de cana-de-açúcar

Ano	Área Total de Expansão (ha)				
	Sud Mennucci	Ilha Solteira	Pereira Barreto	Suzanápolis	Itapura
2001	0	0	0	0	0
2002	250	0	815	1201	0
2003	2318	0	252	-40	0
2004	433	68	615	515	792
2005	504	434	136	1126	12
2006	368	96	417	40	0
2007	1827	2749	6453	1839	2913
2008	3780	7638	8913	1034	3853
2009	1061	3889	3968	-966	1979
2010	-188	500	1713	174	701
2011	-435	892	619	-238	59

Fonte: Dados do CANASAT, Rudorff et al. (2010) e Adami et al. (2012)

Os dados de áreas reformadas por município (Tabela 6) demonstram que o município de Sud Mennucci foi o que mais reformou áreas de cana-de-açúcar no período estudo, principalmente em 2011, onde chegou a reformar 3200 ha, este fato se deve basicamente ao fato deste município ser o que apresenta áreas mais antigas de cultivo. Já os demais municípios por apresentarem áreas mais nova de cultivo, apresentam áreas muito pequenas de reforma, sendo um grande crescimento dessas observado apenas em Pereira Barreto, onde passou de uma área de reforma de 248 ha em 2010 para uma área de 1087 ha em 2011.

Segundo Borba e Bazzo (2009), a decisão de reforma dos canaviais é tomada pelas empresas a partir de um acompanhamento da produtividade do canavial em cada corte, para então definir o estágio economicamente mais viável de interrupção do ciclo produtivo. Os mesmos autores realizaram um estudo econômico avaliando os dados fornecidos por uma associação dos plantadores de cana da região administrativa de Ribeirão Preto/SP, com preços utilizados correspondentes à safra 2007/08 e encontram o melhor estágio para a reforma dos canaviais, com maior frequência, no sexto corte.

Observando a proporção das áreas reformadas em relação as áreas de expansão, verifica-se que a reforma dos canaviais na região esta ocorrendo em pequenas proporções e com um numero de cortes maior do que o indicado por Borba e Bazzo (2009).

Tabela 6 - Áreas de reforma da cana-de-açúcar no noroeste paulista

Ano	Área Total em Reforma (hectare)				
	Sud Mennucci	Ilha Solteira	Pereira Barreto	Suzanápolis	Itapura
2003	1201	0	0	87	0
2004	141	0	25	13	0
2005	1326	0	487	22	10
2006	810	0	147	521	0
2007	433	0	185	8	0
2008	2467	135	213	0	182
2009	1084	0	204	5	0
2010	214	251	248	276	332
2011	3200	185	1087	299	400

Fonte: Dados do CANASAT, Rudorff et al. (2010) e Adami et al. (2012)

Dividindo a área de cana em cada município pela área total, encontra-se a porcentagem de toda área municipal que é ocupada pela cultura (Tabela 7). Dessa forma observa-se que o município com a maior proporção de área destinada ao cultivo de cana-de-açúcar foi o município de Itapura chegando a 34%, porém este valor refere-se a área total do município, como neste trabalho as imagens que foram utilizadas não abrangem a área total do município, ao utilizar apenas a área presente na imagem a área do município passa de 30.724 ha para 24.803 ha, já a área de cana passa de 10.309 ha em 2011 para 8.558 ha, aumentando assim a proporção para 35%.

Para o município de Suzanápolis a proporção em 2008 chegou a 24 %, diminuindo para 21% no ano seguinte e se mantendo assim nos dois últimos anos. Já para os

municípios de Sud Mennucci e Ilha Solteira a proporção no ano de 2011 foi de 25%, sendo que em Sud Mennucci a maior porcentagem foi obtida nos dois anos anteriores com 26% enquanto em Pereira Barreto a maior porcentagem foi observada nos anos de 2010 e 2011 com 24%.

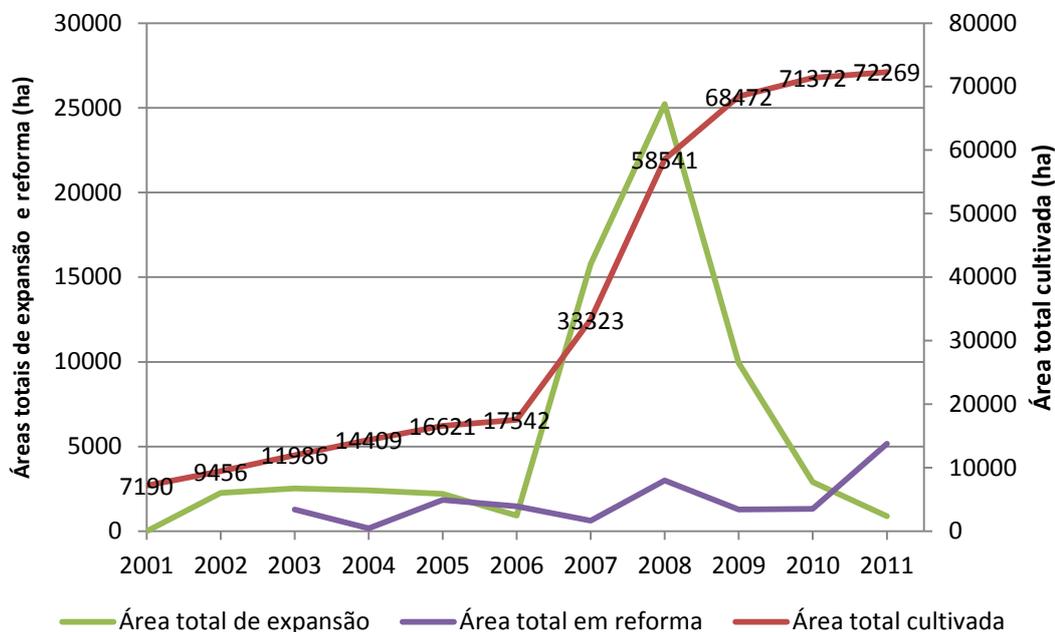
Tabela 7 - Porcentagem da área do município ocupada com a cultura da cana-de-açúcar

Ano	Sud Mennucci	Ilha Solteira	Pereira Barreto	Suzanápolis	Itapura
2001	9	0	0	6	0
2002	9	0	1	10	0
2003	13	0	1	10	0
2004	14	0	2	11	3
2005	15	1	2	15	3
2006	15	1	2	15	3
2007	18	5	9	21	12
2008	25	17	18	24	25
2009	26	23	22	21	31
2010	26	23	24	21	33
2011	25	25	24	21	34

Fonte: Dados do próprio autor.

De acordo com os dados da Figura 4, verifica-se que a área total de produção da cultura da cana-de-açúcar teve um salto principalmente entre anos de 2006 a 2007 e de 2007 a 2008, onde a área passou de 17.542 ha em 2006 para 58.541 ha em 2008, o que representa um aumento de 333,7%, fato que corresponde a expansão da área que chegou a um pouco mais de 15.000 ha em 2007 e chegou aos 25.000 ha em 2008.

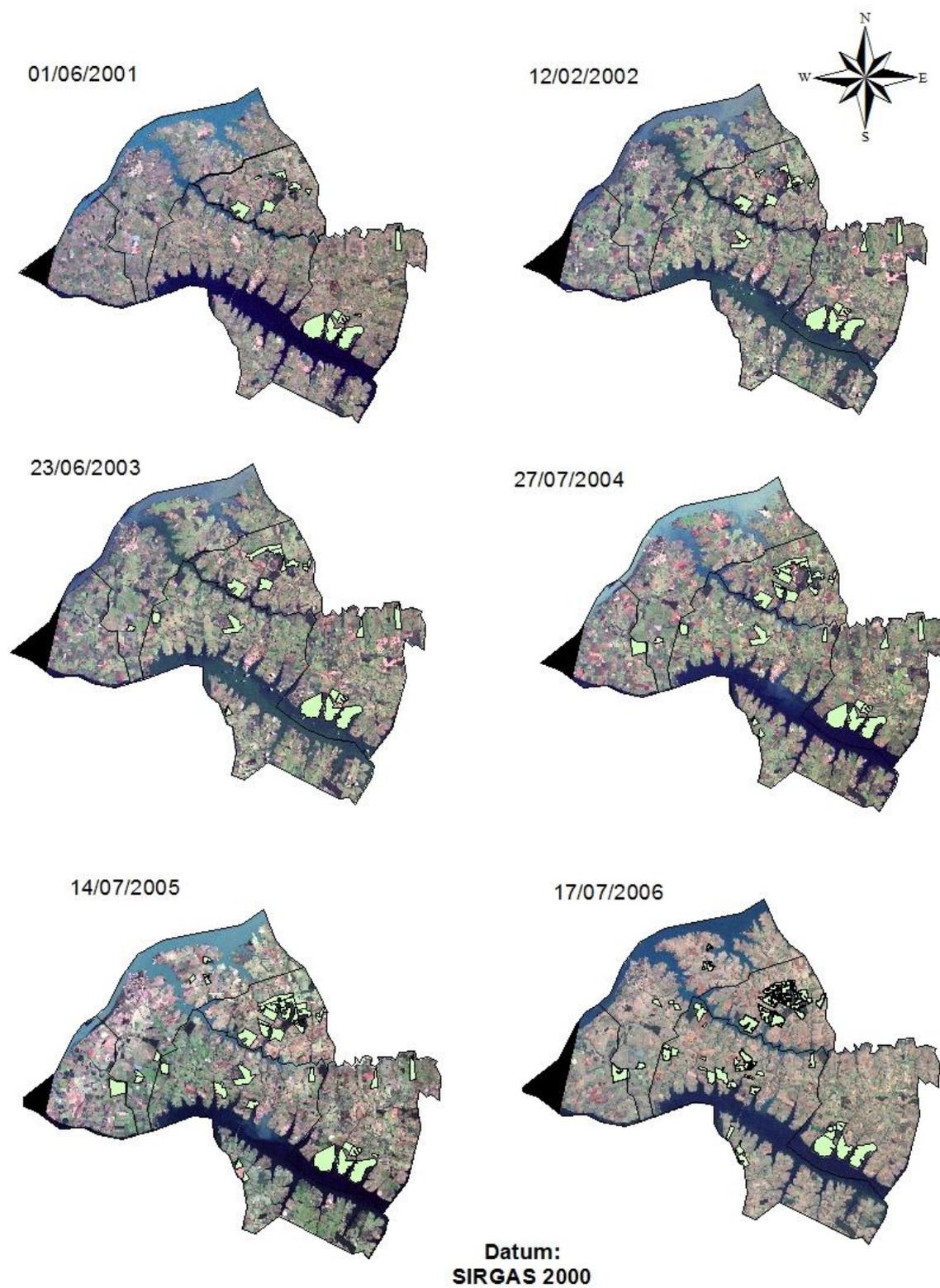
Figura 4 - Áreas totais de expansão, reforma e cultivada com a cultura da cana-de-açúcar no noroeste paulista



Fonte: Dados do CANASAT, Rudorff et al. (2010) e Adami et al. (2012)

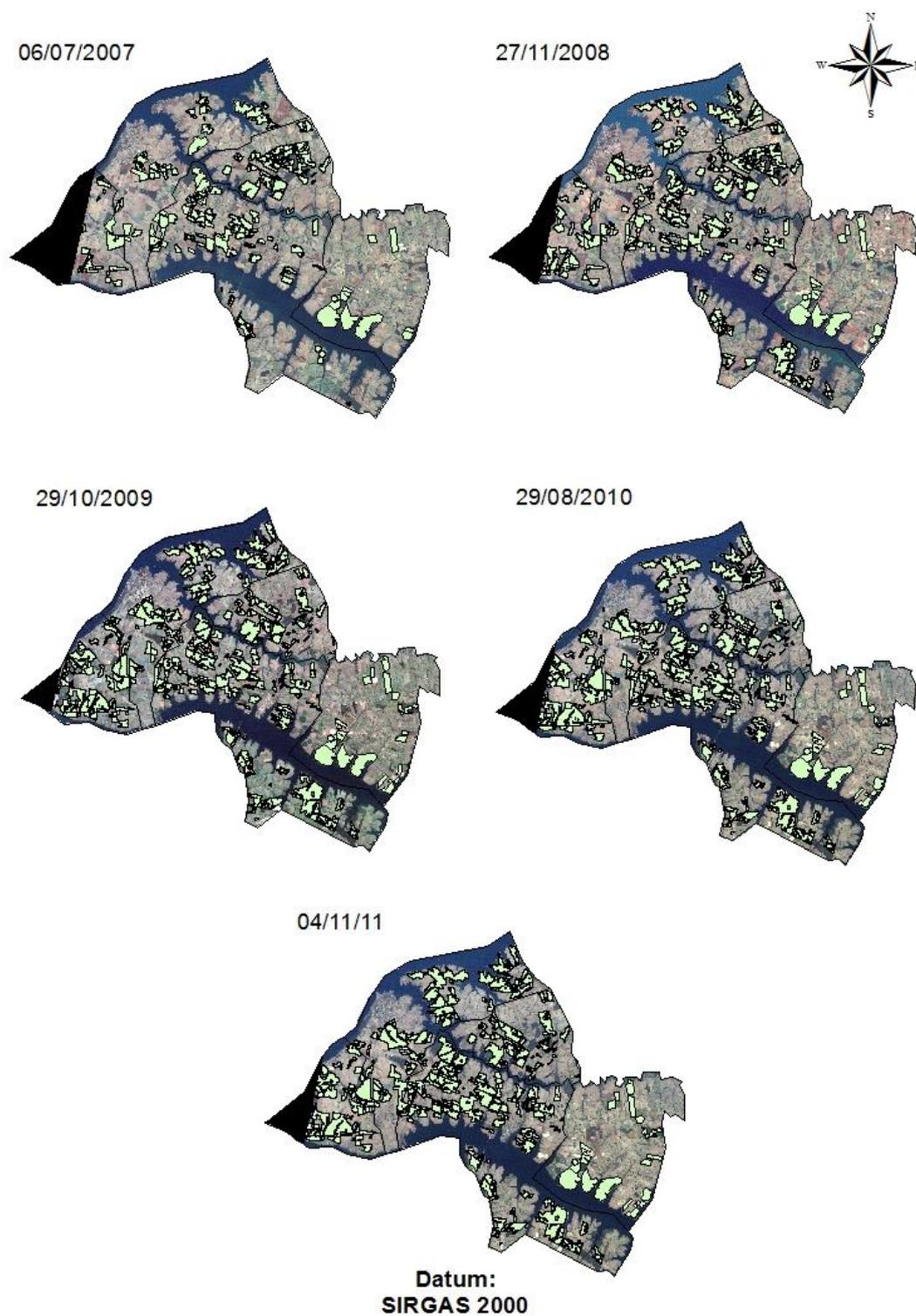
Situação semelhante também foi observada por Lopes (2008), que estudando o histórico da distribuição agrária do município de Castilho, que faz divisa com a área estudada neste trabalho, encontrou um aumento de 400% na área plantada com cana neste município, onde a área passou de 2.000 ha em 2004 para mais de 8.000 ha em 2006.

Figura 5 - Evolução das áreas de cana-de-açúcar no noroeste paulista de 2001 a 2006



Fonte: Próprio autor.

Figura 6. Evolução das áreas de cana-de-açúcar no noroeste paulista de 2007 a 2011



Já em 2011 a área total ocupada pela cultura da cana nos municípios foi de 72.269 ha (Figura 5 e 6), o que corresponde a 25% da área total dos cinco municípios juntos. Dessa forma todos os dados do balanço de radiação e de energia foram avaliados a partir de então dividindo-se as avaliações em dois períodos, sendo o primeiro período correspondendo de 2001 a 2004, onde o cultivo de cana estava abaixo de 15.000 hectares e o segundo período de 2008 a 2011, quando a região passa a ter um cultivo de cana-de-açúcar superior a 58.000 hectares.

2.3.2 Balanço de Energia

Observando o comportamento de $R_{g\downarrow}$ ao longo dos anos (Tabela 8) não é possível encontrar nenhuma diferença significativa, sendo que a radiação de onda curta incidente ($R_{g\downarrow}$) que independe do cultivo, mas é importante para caracterizar a demanda atmosférica, oscila ao longo dos anos variando entre a máxima de $28,76 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no dia 23 de outubro de 2001 e a mínima de $12,77 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em 23 de junho de 2003.

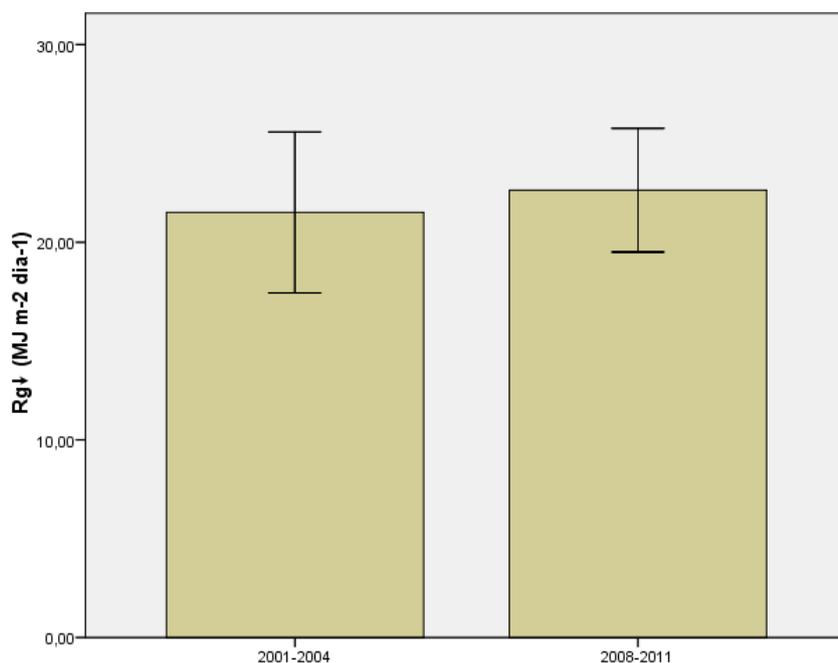
Tabela 8 - Data da imagem, Dia Juliano (D.J.) e radiação de ondas curtas incidentes ($R_{g\downarrow}$), radiação de ondas curtas emitidas pela superfície ($R_{r\uparrow}$), radiação de ondas longas incidentes ($R_{l\downarrow}$) e radiação de ondas longas emitidas ($R_{l\uparrow}$), saldo de radiação (RN), Relação RN/RG e albedo

Data da imagem	DJ	$MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$						Rn/Rg	Albedo
		$R_{g\downarrow}$	$R_{r\uparrow}$	$R_{l\downarrow}$	$R_{l\uparrow}$	Rn			
01/06/2001	152	15,98	2,5	31,59	38,15	6,93	0,43	0,16	
23/10/2001	296	28,76	4,72	31,54	39,98	15,59	0,54	0,16	
27/01/2002	27	21,12	3,29	36,18	43,16	10,85	0,51	0,16	
12/02/2002	43	28,04	4,34	33,35	42,49	14,56	0,52	0,15	
23/06/2003	174	12,77	1,74	31,77	36,32	6,42	0,50	0,14	
13/10/2003	286	25,43	3,71	31,32	38,61	14,23	0,56	0,15	
21/03/2004	81	22,15	3,06	33,15	40,82	11,29	0,51	0,14	
27/07/2004	209	17,8	2,43	29,72	35,21	9,76	0,55	0,14	
Média	-	21,51	3,22	32,33	39,34	11,20	0,52	0,15	
22/07/2008	204	17,8	2,87	31,93	40,16	6,69	0,38	0,16	
27/11/2008	332	26,95	4,51	33,78	42,06	14,17	0,53	0,17	
26/08/2009	238	20,95	3,29	30,94	37,7	10,89	0,52	0,16	
29/10/2009	302	25,8	4,29	33,38	41,37	13,51	0,52	0,17	
02/02/2010	33	26,27	4,06	34,78	43,75	13,23	0,50	0,15	
29/08/2010	241	18,97	3,3	34,13	42,05	7,79	0,41	0,17	
15/07/2011	196	16,92	2,7	31,06	38,1	7,18	0,42	0,16	
04/11/2011	308	27,41	4,69	32,73	40,91	14,53	0,53	0,17	
Média	-	22,63	3,71	32,84	40,76	11,00	0,48	0,16	
Média Geral		22,07	3,47	32,58	40,05	11,10	0,50	0,16	

Fonte: Dados do próprio autor

A média de $R_{g\downarrow}$ para todo o período avaliado foi de $22,07\ MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$, ao se separar as médias entre os dois período avaliados, o primeiro período que vai de 2001 a 2004 apresentou uma média de $21,51\ MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$, enquanto que a média para o segundo período de 2008 a 2011 foi de $22,63\ MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$, porém de acordo com a Figura 7 é possível afirmar que não houve diferença estatística entre os dois períodos.

Figura 7 - Valores médios de radiação global incidente no noroeste paulista

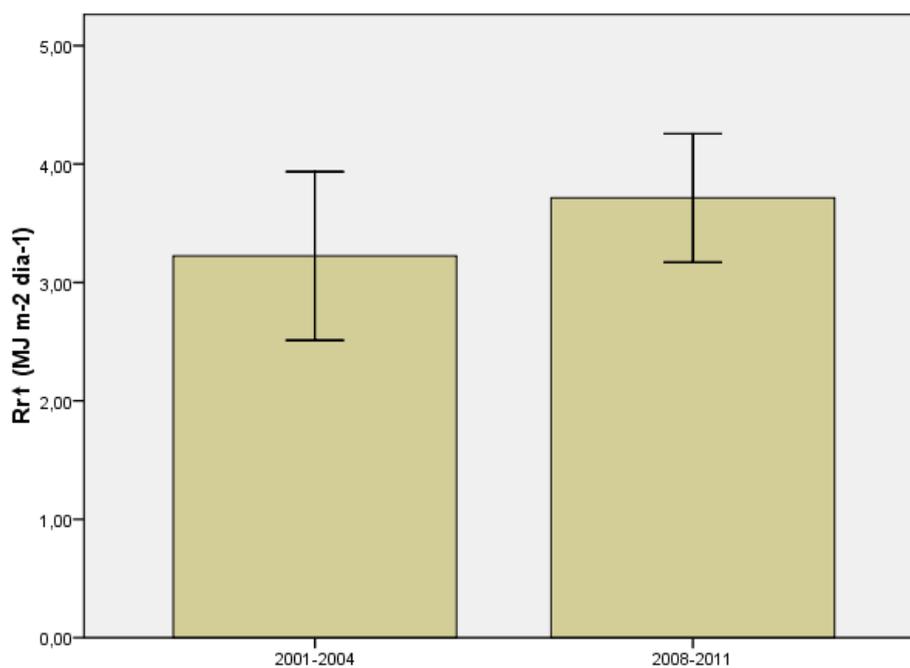


Fonte: Dados do próprio autor

Por ser composta majoritariamente pela porção refletida da radiação de ondas curtas incidentes, os valores de $Rg\uparrow$ são diretamente determinados pelos valores de $Rg\downarrow$, dessa forma também não é possível observar nenhuma tendência ao longo dos anos, onde a média de $Rg\uparrow$ para todo o período avaliado foi de $3,47 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, sendo o valor máximo de $4,72 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e o mínimo de $1,74 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, sendo estes ocorrendo na mesma data dos valores extremos de $Rg\downarrow$ por serem valores diretamente relacionados.

Ao comparar os valores médios de $Rr\uparrow$ para os dois períodos observados, encontra-se uma média de $3,13 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para o período de 2001 a 2004 e de $3,71 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para o período de 2008 a 2011, valores estes que não apresentaram diferença estatística entre eles (Figura 8).

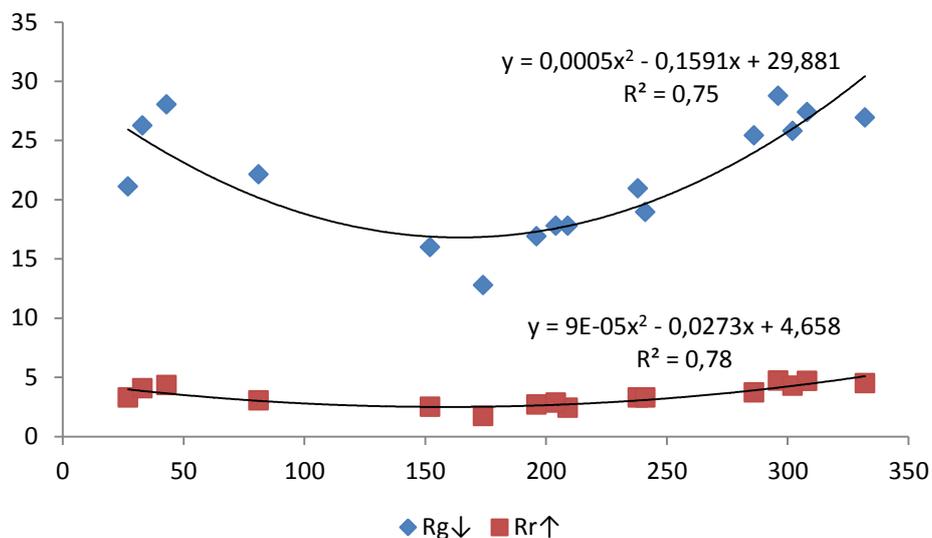
Figura 8 - Valores médios de radiação global emitida pela superfície no noroeste paulista



Fonte: Dados do próprio autor

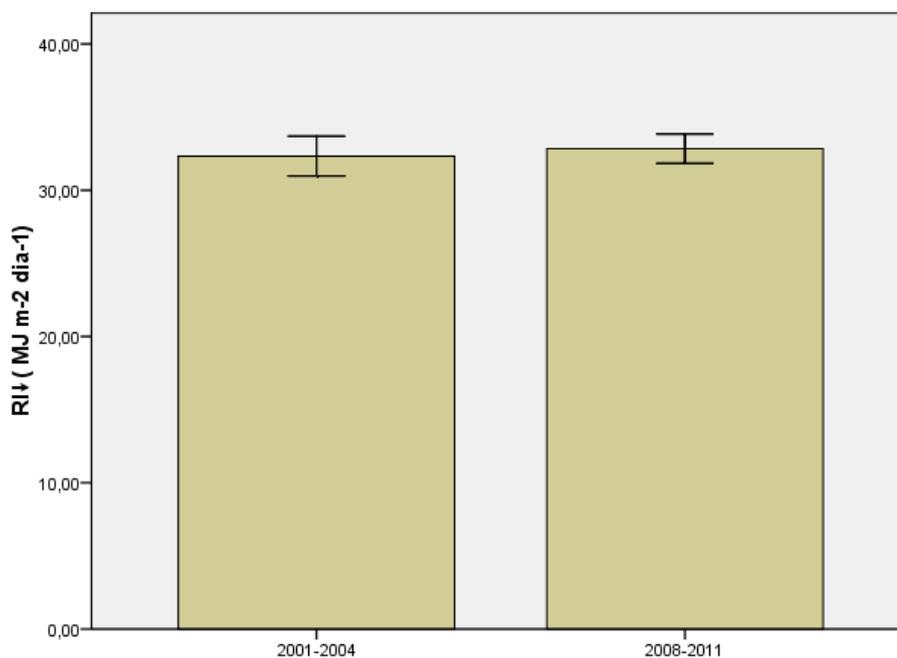
Ao relacionar o dia Juliano da data da imagem (Figura 9) observa-se a alta correlação quadrática para $Rg\downarrow$ e $Rr\uparrow$, sendo os valores de R^2 de 0,75 e 0,78 respectivamente. Esse comportamento demonstra que os valores de $Rg\downarrow$ e $Rr\uparrow$, foram influenciados pela época do ano e não pela ocupação do uso do solo que aconteceu ao longo dos anos.

Figura 9 - Valores de $R_{g\downarrow}$ e $R_{r\uparrow}$ em correlação ao Dia Juliano (DJ) da imagem



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 10 - Valores médios de radiação de onda longa incidente no noroeste paulista



Fonte: Dados do próprio autor

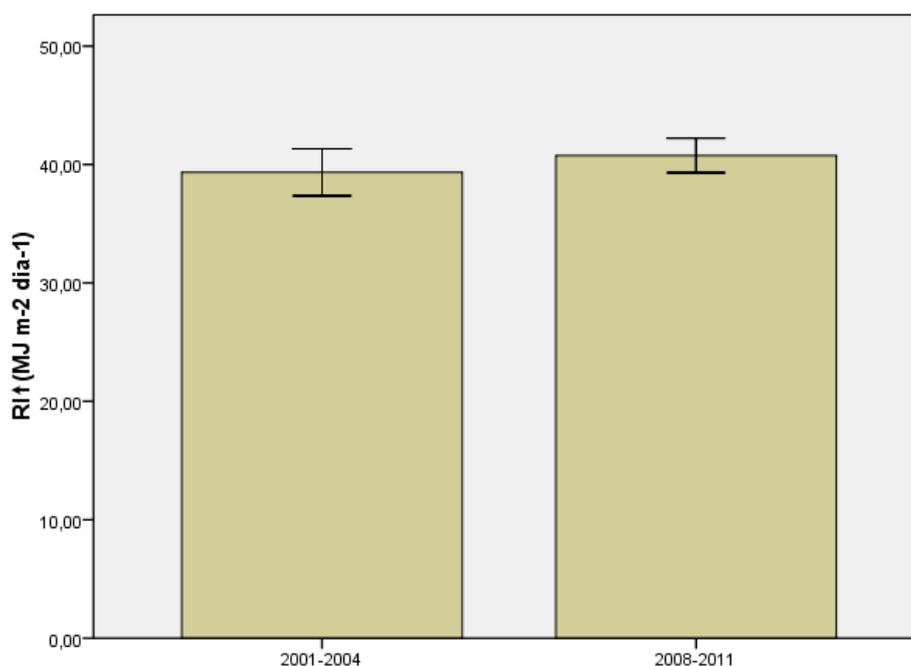
Avaliando os valores de $RI\downarrow$, observa-se que durante todo o período não houve em nenhum ano uma grande variação em relação a média, sendo esta de $32,58 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, sendo o valor máximo encontra de $36,18 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ocorrido no dia 27 de janeiro de 2002 e o valor mínimo de $29,72 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ encontrado em 27 de julho de 2004. Ao se

observar as médias de RI_{\downarrow} diferenciando-se os dois períodos, a média para o primeiro período passa a ser de $32,33 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, valor muito próximo tanto a média total, quanto a média do segundo período que ficou em $32,84 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, dessa forma não foi observada nenhuma diferença estatística entre os períodos (Figura 10), sendo possível observar apenas uma menor variação dos valores no período de 2007 a 2011 em relação ao período de 2001 a 2006.

Comparando os valores de radiação de ondas longas emitidas (RI_{\uparrow}) encontra-se uma média de $40,05 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para o período completo, variando com valor mínimo de $35,21 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ocorrido no dia 27 de julho de 2004, já o valor máximo foi de $43,75 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ observado no dia 02 de fevereiro de 2010. Ao separar a média para o primeiro período encontra-se um valor de $39,34 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para o período de 2001 a 2004 e uma média de $40,76 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para os anos de 2008 a 2011.

Porém de acordo com a Figura 11 que apresenta a avaliação estatística entre as médias para os períodos antes e depois da expansão da cana-de-açúcar, verifica-se que assim como a RI_{\downarrow} ambos os períodos não diferem estatisticamente entre si, demonstrando apenas uma menor variação entre os valores do período de 2008 a 2011 em relação ao primeiro período.

Figura 11 - Valores médios de radiação de onda longa emitidas no noroeste paulista

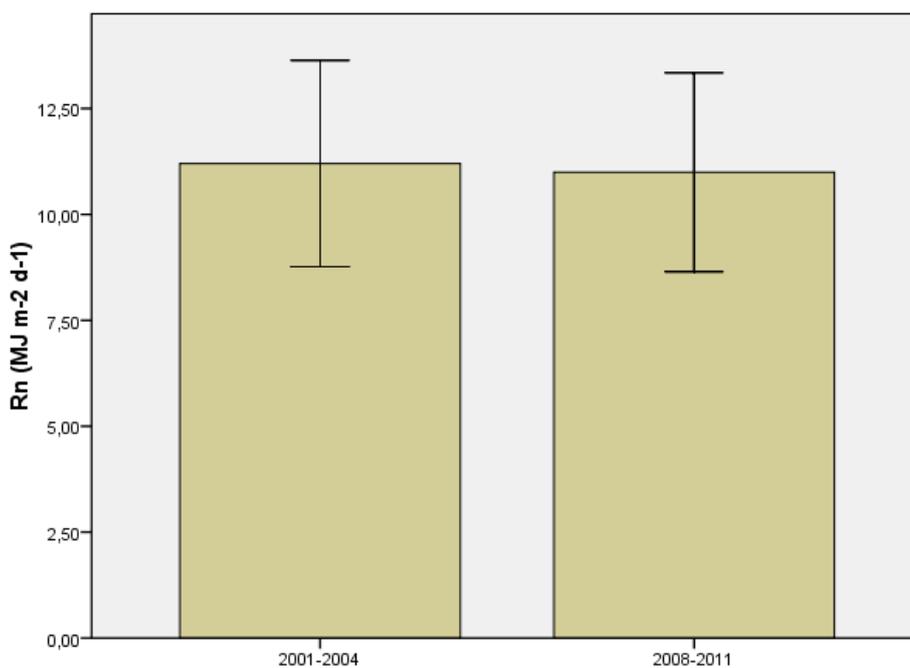


Fonte: Dados do próprio autor

Os resultados para Rn também não apresentaram diferença estatística entre os dois períodos (Figura 12), onde foi encontrada um média de $11,20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ entre 2001 e 2004 e uma média de $11,00 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de 2008 a 2011, com uma média geral para todo o período de $11,10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, valor próximo aos encontrados por Teixeira et al. (2008b), que encontrou uma média de Rn de $11,08 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no período de 2004 a 2005 para uma cultura de mangueira irrigada na região da bacia do rio São Francisco.

O maior valor de Rn para todo o período avaliado, foi obtido em 23 de outubro de 2001, onde chegou a $15,59 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, valor este obtido devido ao valor de $R_{g\downarrow}$ que apresentou o valor máximo para o período nesta mesma data. Já o menor valor de Rn obtido foi de $6,69 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ encontrado em 22 de julho de 2008, também relacionado ao baixo valor de $R_{g\downarrow}$ encontrado nesta mesma data.

Figura 12 - Valores médios de saldo de radiação no noroeste paulista



Fonte: Dados do próprio autor

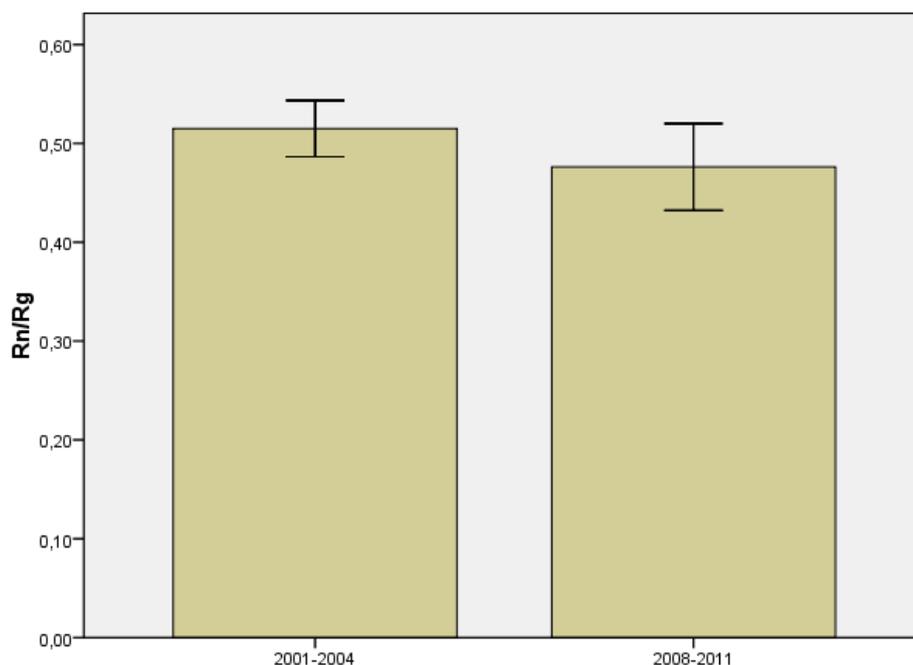
Observando os valores da fração Rn/Rg (Tabela 8), verifica-se que a média obtida para o período avaliado foi de 0,50, variando entre a mínima de 0,38 em 27 de julho de 2008 e máxima de 0,56 em 13 de outubro de 2013. Ao comparar as médias para os dois períodos, encontra-se o valor de 0,52 para o primeiro período e de 0,48 para o segundo, porém apesar, de demonstrar uma diminuição da média para o segundo período, tendo

este uma maior variação dos valores, não foi constatado nenhuma variação no período avaliado (Figura 13).

Resultado muito semelhante foi obtido por Teixeira, Hernandez e Lopes (2012) que encontraram valores médios de 0,46 de Rn/Rg , com mínimo e máximo de 0,42 e 0,50, respectivamente. Os mesmos autores ainda justificam o fato dos dados não seguirem uma tendência, pois a relação Rn/Rg é diretamente dependente das condições climáticas, onde temperaturas mais elevadas, aumentam os valores de $R_{l\uparrow}$, diminuindo a Rn e consequentemente a relação Rn/Rg .

Observa-se um acréscimo nos valores de albedo (α_o) (Tabela 8), que apresentou uma média de 0,16 para o período completo avaliado, sendo o mínimo obtido de 0,14 encontrado nas datas de 23 de junho de 2003, 21 de março de 2004 e 27 de julho de 2004, já os valores máximos de 0,17 foram obtidos em quatro datas, sendo todas no segundo período de avaliação nas datas de 27 de novembro de 2008, 29 de outubro de 2009, 29 de agosto de 2010 e 4 de novembro de 2011.

Figura 13 - Valores médios da relação Rn/Rg no noroeste paulista

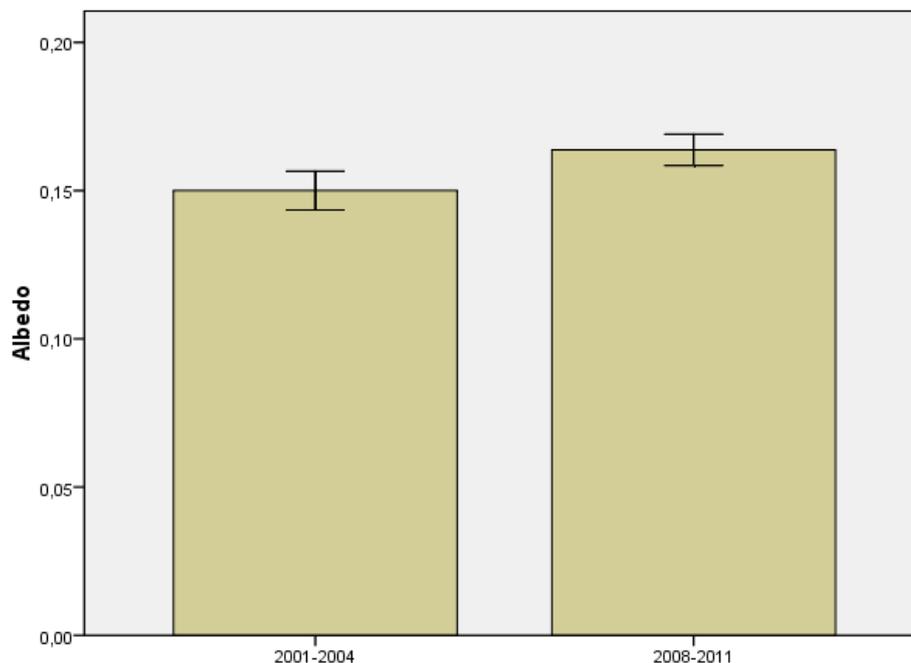


Fonte: Dados do próprio autor

Observando os valores médios para os dois períodos, encontra-se uma média de 0,15 e 0,16 entre os períodos de antes e após a expansão da área de cana-de-açúcar.

Apesar dessa diferença ser numericamente baixa, ao se avaliar os erros padrões das médias, observa-se que houve diferença estatística entre os períodos (Figura 14).

Figura 14 - Valores médios de Albedo no noroeste paulista



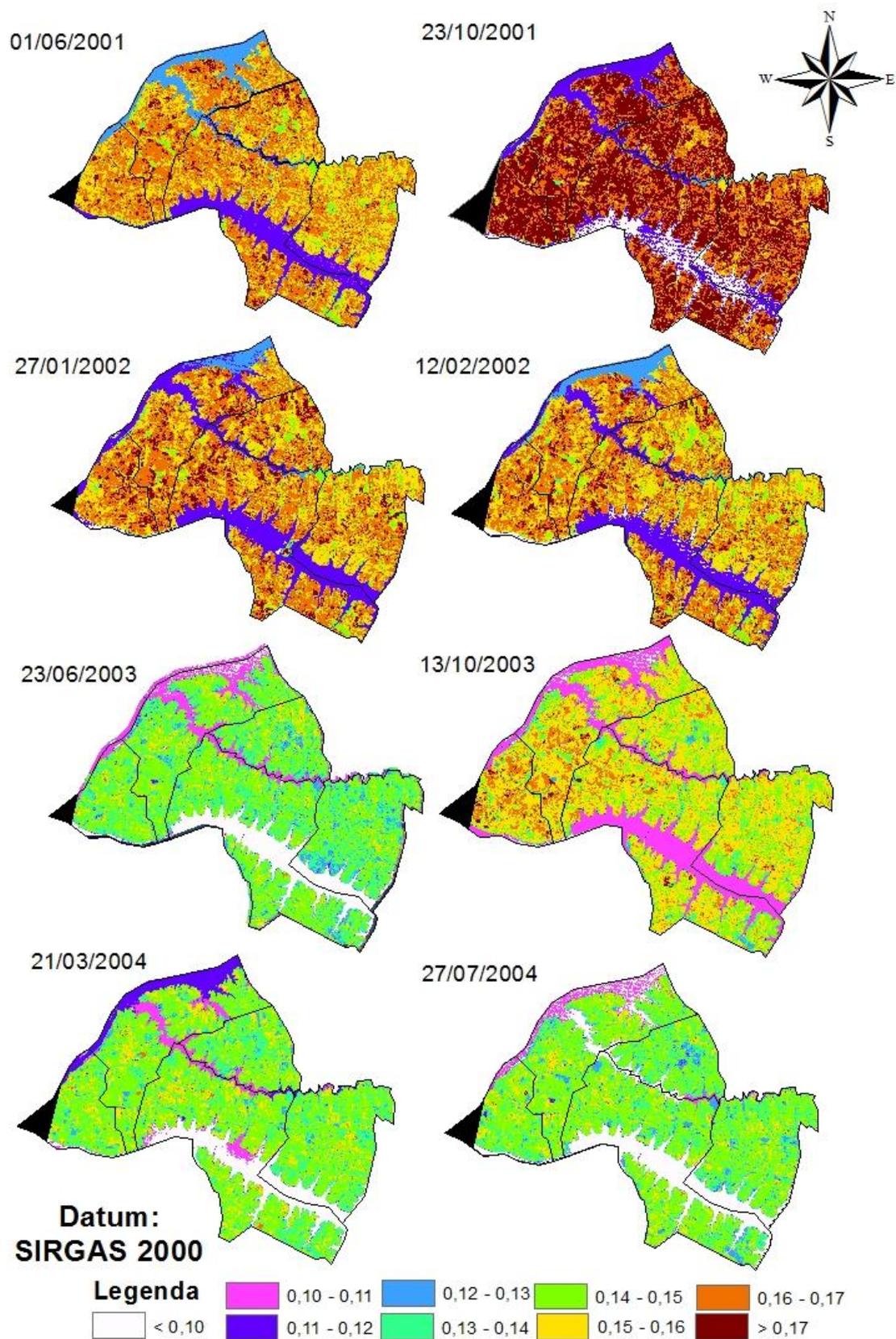
Fonte: Dados do próprio autor

Interpretando visualmente as Figuras 15 e 16 nota-se que os valores médios de albedo não estão sendo influenciados diretamente por valores extremos encontrados nas áreas de cana-de-açúcar, onde os valores médios são representativos para toda a área, sendo que para o primeiro período não houve uma homogeneidade entre os valores encontrados, sendo que nos anos de 2001 e 2002 apresentam valores predominantes acima de 0,15 enquanto os anos de 2003 e 2004 apresentaram um predomínio de valores abaixo de 0,15 (Figura 15).

Já os dados da Figura 16 demonstram uma homogeneidade maior entre as datas, sendo que estas apresentam os valores de albedo em sua maioria acima de 0,15 porém com predomínio de valores superiores a 0,17.

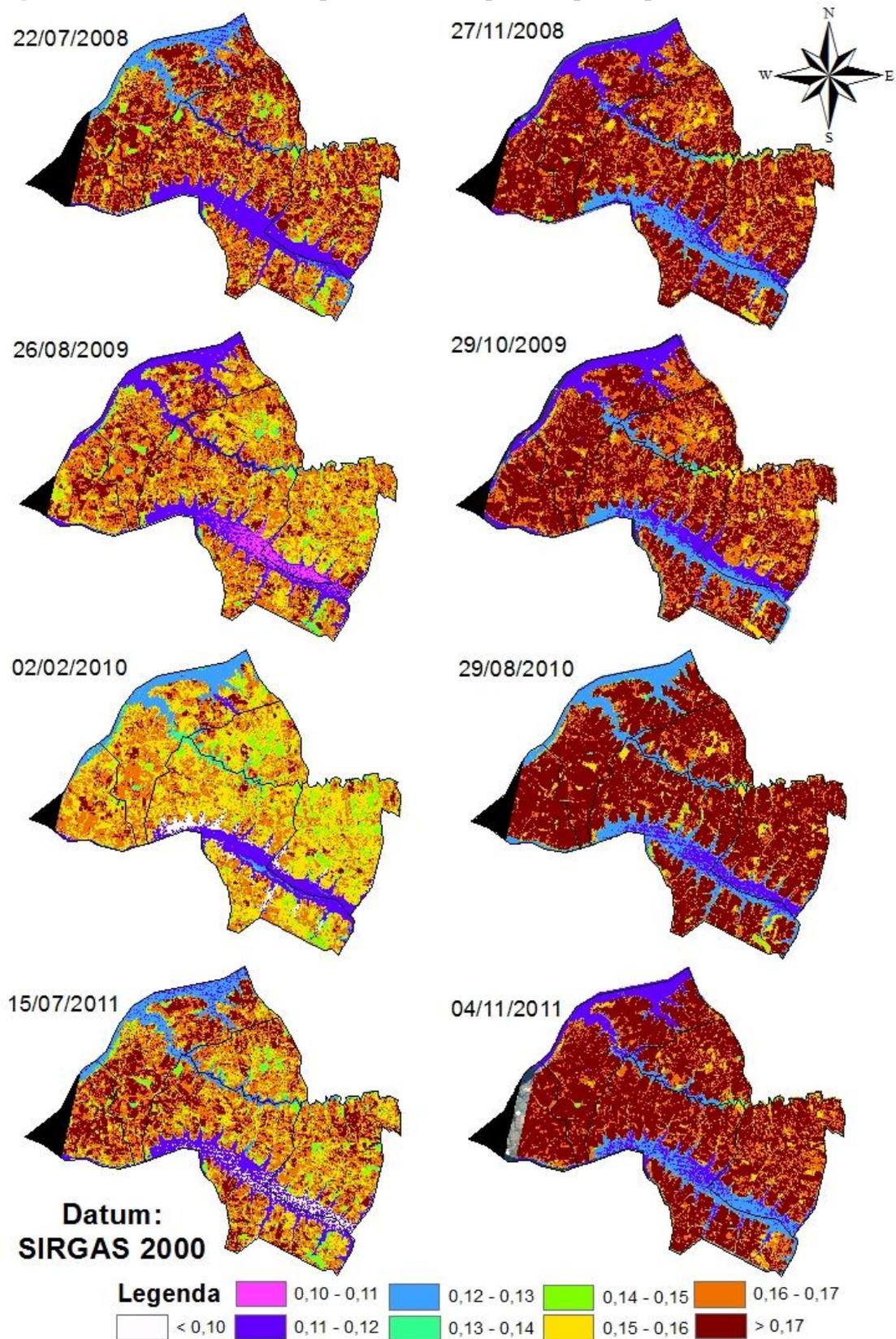
O aumento dos valores médios a partir do segundo período com maior presença de áreas cultivadas com a cultura justifica-se pelos maiores valores de albedo apresentados pela cultura da cana em relação ao valor médio encontrado para a área total (Figura 17).

Figura 15 - Valores de albedo para o noroeste paulista para o período de 2001 a 2004



Fonte: Dados do próprio autor

Figura 16 - Valores de albedo para o noroeste paulista para o período de 2008 a 2011

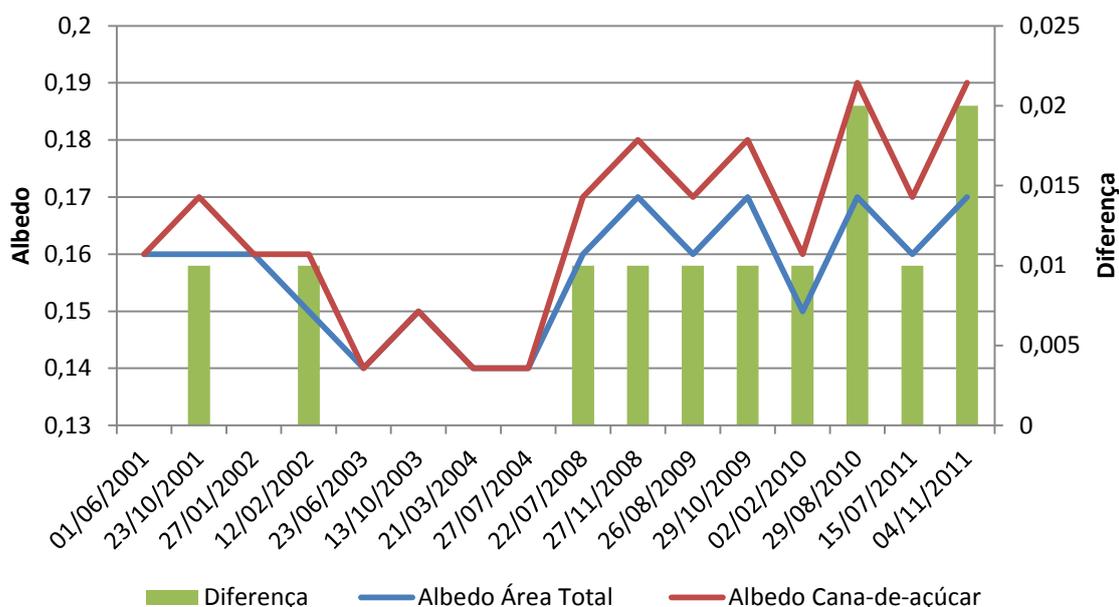


Fonte: Dados do próprio autor.

A Figura 17 demonstra que no período de 2001 a 2004 os valores de albedo da cana de açúcar foram superiores a área total apenas nas datas de 23 de outubro de 2001 e 12 de fevereiro de 2002, os valores de albedo da área total apresentaram respectivamente valores de 0,16 e 0,15 enquanto os valores para a área de cana de açúcar foi de 0,17 e 0,16.

A partir do segundo período, os valores médios de albedo para a cana apresentaram-se sempre superiores aos valores médios da área total, sendo que as datas de 29 de agosto de 2010 e 04 de novembro de 2011 apresentaram valor médio de albedo de 0,17 enquanto a média do albedo da cana foi de 0,19.

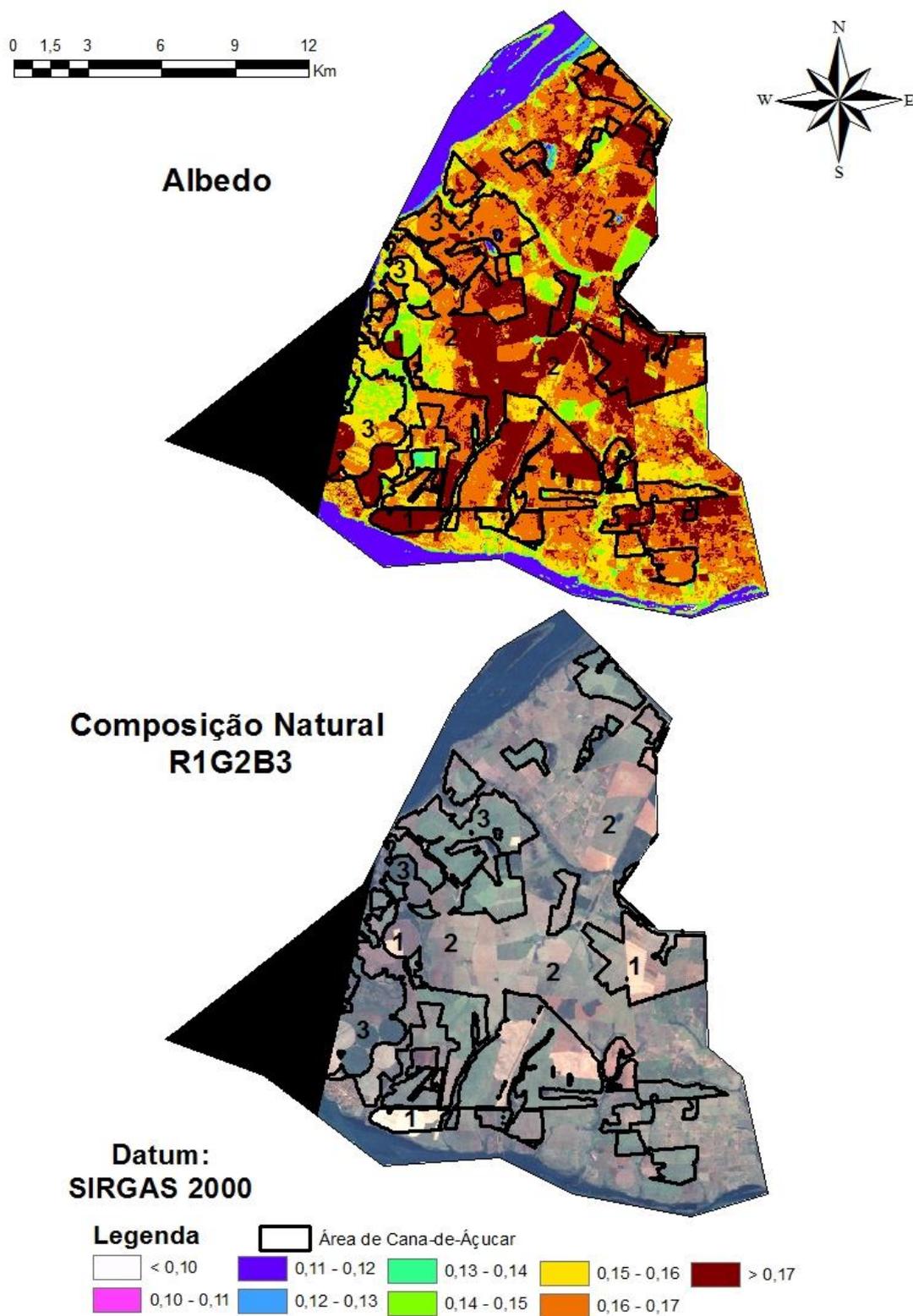
Figura 17 - Valores médios Albedo para toda a área de estudo e para a cultura da cana-de-açúcar



Fonte: Dados do próprio autor

Valores semelhantes de albedo para cana-de-açúcar foram encontrados por Mendonça (2007) que utilizando-se do algoritmo SEBAL para estimar os componentes do balanço de energia na superfície de diferentes tipos de cobertura sobre a região Norte Fluminense, RJ, por meio de imagens do sensor MODIS, encontrou valores de albedo para a cultura da cana variando entre 0,14 e 0,18. Já Giongo et al. (2010) obtiveram valores que variaram de 0,14 a 0,23 estimando dados de albedo à superfície terrestre usando o sensor Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT 5 em uma área localizada no município de Santa Rita do Passa Quatro, SP, Brasil.

Figura 18 - Mapas de Albedo e composição natural para o município de Itapura na data de 26 de agosto de 2009



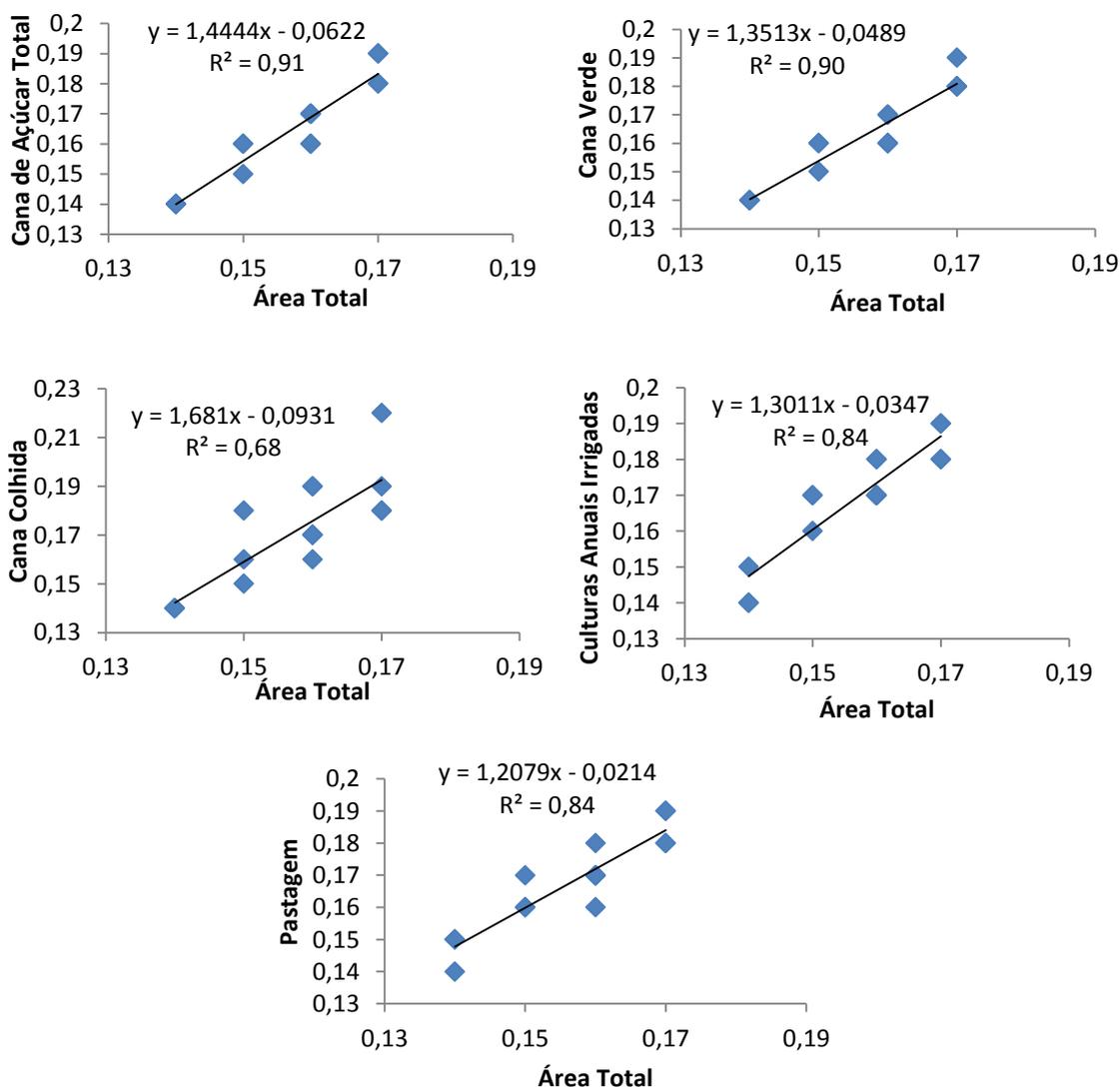
Fonte: Dados do próprio autor

Para observar o comportamento dos valores de albedo nas áreas de cana-de-açúcar selecionou-se a imagem de 26 de agosto de 2009 por se tratar de uma época que abrange

a colheita da cana, possibilitando verificar os valores de albedo tanto para as áreas vegetativas quanto das áreas de colheita.

Por efeito de espaço, para que se tivesse um mapa de tamanho suficiente para uma boa observação, foi selecionado apenas um município, no caso o município de Itapura, por ser o que apresentava a maior concentração de áreas de cana-de-açúcar (Tabela 7).

Figura 19 - Dispersão dos valores médios de albedo para a área total de estudo em relação a diferentes classes de uso e ocupação do solo



Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 18 é possível observar que tanto as áreas de cana de açúcar que haviam sido colhidas, quanto as áreas de pastagem, identificadas nos mapas respectivamente pelos números 1 e 2, apresentaram valores de albedo

predominantemente acima de 0,16 enquanto as áreas de cana verde, identificadas no mapa pelo número 3, os valores de albedo predominantes estão entre 0,15 a 0,17 demonstrando que para esta imagem as áreas de cana-de-açúcar estão influenciando diretamente o valor médio do albedo para toda a área de estudo. Esta observação é reforçada pela Figura 19 que demonstra que ao relacionar os valores médios de albedo para toda a área de estudo com os valores médios de albedo para diferentes classes de uso e ocupação do solo, a cultura da cana-de-açúcar como um todo, foi a que apresentou o maior valor de R^2 , demonstrando que os valores obtidos para esta cultura estão fortemente relacionados aos valores encontrados para a média total da área.

2.3.3 NDVI, Consumo de Água e Fluxos de Energia

Tabela 9 - Data da imagem, dia juliano (D.J.), NDVI, evapotranspiração atual (ETa), relação ETa/ETo, relação fluxo de calor latente pelo saldo de radiação $\lambda E/Rn$, relação fluxo de calor sensível pelo saldo de radiação (H/Rn) e temperatura de superfície (TS)

Data da imagem	DJ	NDVI	ETa (mm dia ⁻¹)	ETa/ETo	$\lambda E/Rn$	H/Rn	TS (K)
01/06/2001	152	0,37	1,17	0,34	0,41	0,59	299,64
23/10/2001	296	0,34	1,95	0,20	0,30	0,70	303,51
27/01/2002	27	0,41	2,01	0,31	0,45	0,55	308,52
12/02/2002	43	0,42	2,46	0,33	0,41	0,59	307,21
23/06/2003	174	0,56	1,29	0,53	0,49	0,51	294,88
13/10/2003	286	0,48	2,23	0,38	0,38	0,62	300,30
21/03/2004	81	0,63	3,08	0,61	0,67	0,33	303,70
27/07/2004	209	0,51	1,89	0,52	0,47	0,53	292,78
Média	-	0,47	2,01	0,40	0,45	0,55	301,32
22/07/2008	204	0,30	1,29	0,23	0,46	0,54	304,38
27/11/2008	332	0,31	1,95	0,2	0,33	0,67	307,83
26/08/2009	238	0,27	1,14	0,14	0,25	0,75	299,83
29/10/2009	302	0,39	1,78	0,21	0,31	0,69	305,70
02/02/2010	33	0,44	1,80	0,21	0,33	0,67	309,41
29/08/2010	241	0,18	0,55	0,03	0,16	0,84	309,72
15/07/2011	196	0,25	0,81	0,12	0,27	0,73	300,83
04/11/2011	308	0,29	1,34	0,09	0,21	0,79	305,93
Média	-	0,30	1,33	0,15	0,29	0,71	305,45
Média Geral	-	0,38	1,67	0,28	0,37	0,63	303,39

Fonte: Dados do próprio autor

Comparando os valores de NDVI para todo o período de avaliação (Tabela 9) estes apresentaram uma média de 0,38 tendo neste período o valor mínimo de 0,18 para a data de 29 de agosto de 2010 e a máxima de 0,63 em 21 de março de 2004.

O valor mínimo encontrado pode ser explicado devido a esta data ser a que apresentou o maior período de seca, sendo que na data da passagem do satélite a região se encontrava a 113 dias sem chuva, onde o último volume de precipitação registrado antes desse período foi de apenas 12,5 mm (Tabela 10). Já o valor máximo de NDVI não pode ser apenas justificado pela ocorrência de chuvas, sendo que a última chuva de apenas 17 mm ocorreu 7 dias antes da data da passagem do satélite, porém por se tratar de uma época onde historicamente se caracteriza como período chuvoso na região (SANTOS; HERNANDEZ; ROSSETTI, 2010) estas condições podem ter proporcionado este alto valor observado.

Tabela 10 - Condições hídricas da região do noroeste paulista nas datas das imagens

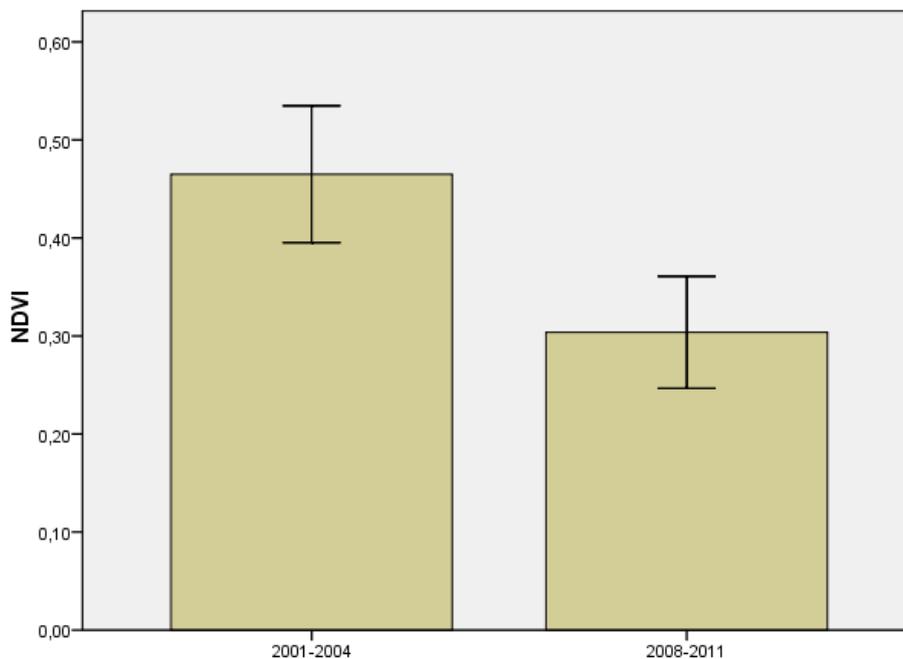
Data da imagem	Dia Juliano	Chuva Acumulada no Ano - C.A. (mm)	ETo Acumulada no Ano - ETo A. (mm)	C.A.-ETo A. (mm)	Dias sem chuva maior que 10 mm	Última chuva (mm)
01/06/2001	152	725,9	539,3	186,6	4	18,0
23/10/2001	296	881,4	1103,7	-222,3	21	27,7
27/01/2002	27	179,2	135,4	43,8	2	22,6
12/02/2002	43	359,6	218,5	141,1	4	61,0
23/06/2003	174	888,9	689,9	199,0	18	17,0
13/10/2003	286	985,1	1174,3	-189,2	4	22,1
21/03/2004	81	320,0	393,9	-73,9	7	17,0
27/07/2004	209	560,2	805,3	-245,1	45	10,2
22/07/2008	204	1276,7	722,0	554,7	54	35,8
27/11/2008	332	1499,9	1355,8	144,1	16	24,1
26/08/2009	238	847,2	940,9	-93,7	6	58,9
29/10/2009	302	1250,2	1215,6	34,6	5	10,4
02/02/2010	33	228,3	148,1	80,2	4	16,3
29/08/2010	241	693,1	926,0	-232,9	113	12,5
15/07/2011	196	961,7	754,8	206,9	36	50,3
04/11/2011	308	1134,3	1316,3	-182,0	5	31,2

Fonte: Dados do próprio autor

Ao observar os valores médios de NDVI separadamente para os dois períodos, encontra-se para o primeiro período de 2001 a 2004 uma média de 0,47; enquanto que, para o segundo período de 2008 a 2011, a média obtida foi de 0,30 demonstrando uma

redução 36% em relação ao primeiro período, sendo que de acordo com a Figura 20, esta redução apresentou diferença estatística entre os períodos.

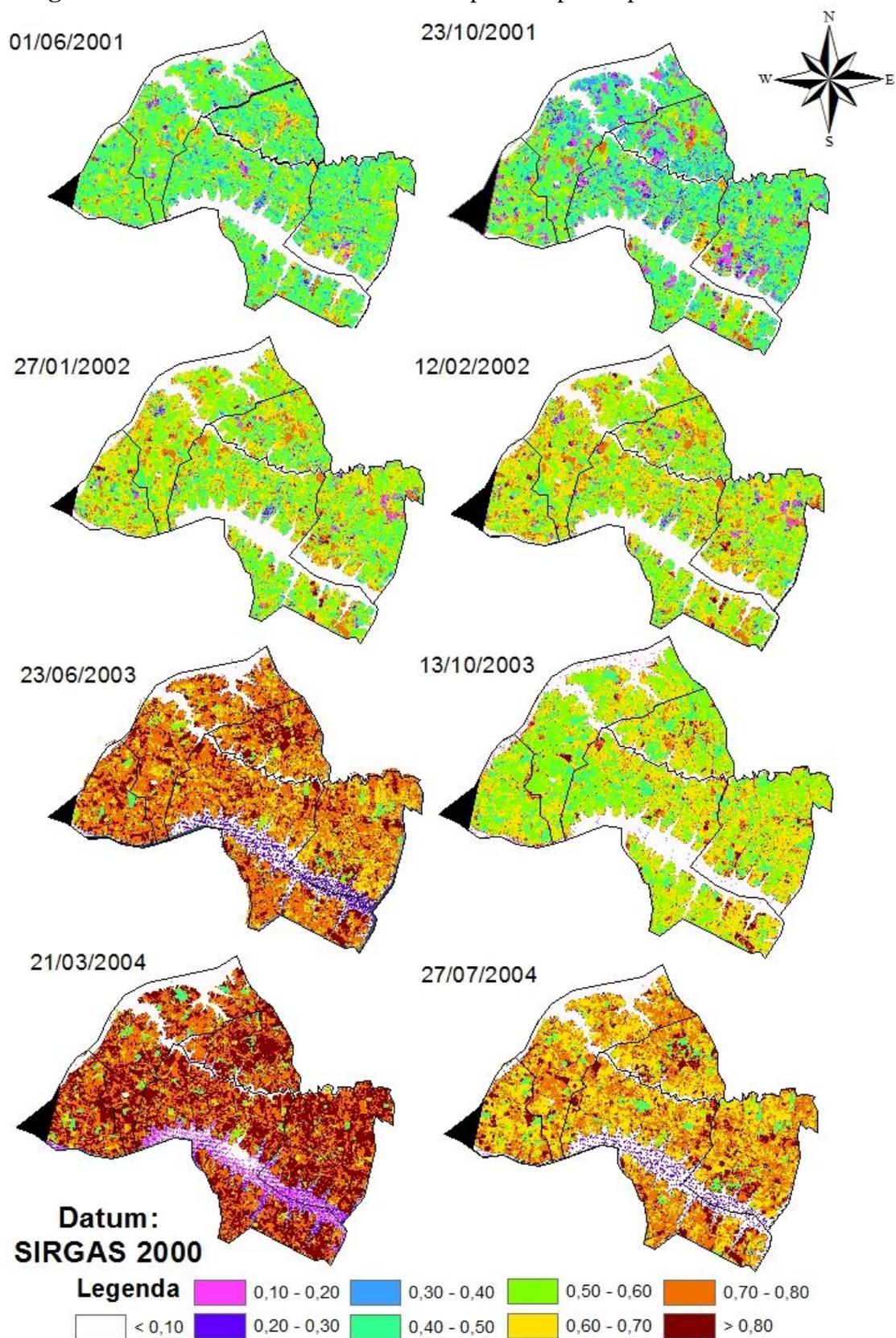
Figura 20 - Valores médios de NDVI para o noroeste paulista



Fonte: Dados do próprio autor.

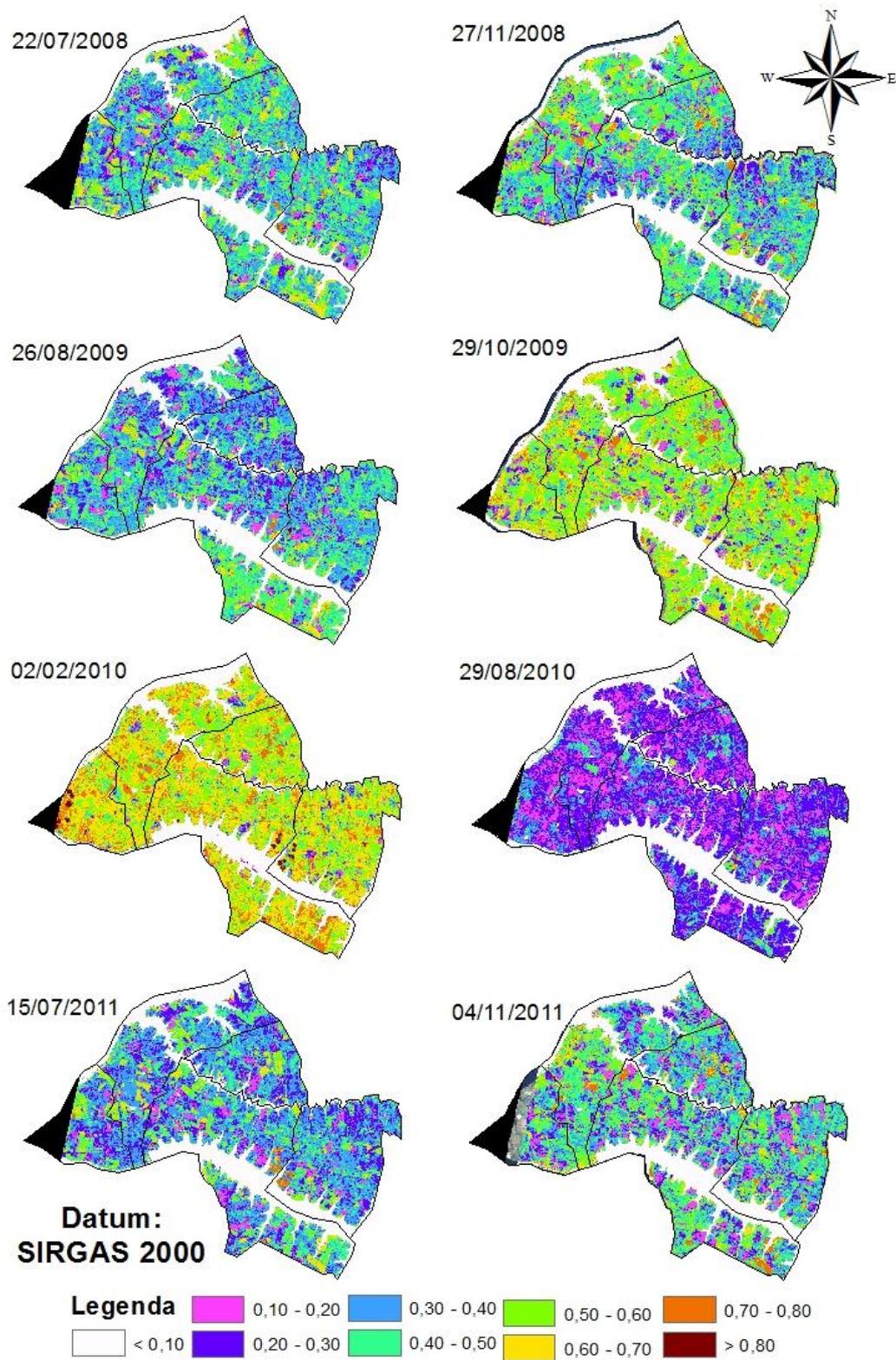
Nas Figuras 21 e 22 além da variação nítida entre os valores médios das imagens, é possível uma variação dentro de cada imagem, onde apesar da presença predominante de alguns valores, há uma variação interna que se acentua principalmente no segundo período de 2008 a 2011 o que indica que esta variação esteja ocorrendo principalmente nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, ideia que é reforçada pelos dados da Figura 23 que demonstra que em todo o período avaliado os valores médios de NDVI das áreas de cana, foram maiores dos que os valores médios de toda área, onde essa diferença aumentava e diminuía seguindo a tendência dos valores médios, ou seja, quanto maior o valor do NDVI médio, maior a diferença entre o NDVI da cana e da área total, onde essa diferença chegou a ser maior do que 0,2 nas imagens do ano de 2002.

Figura 21 - Valores de NDVI no noroeste paulista para o período de 2001 a 2004



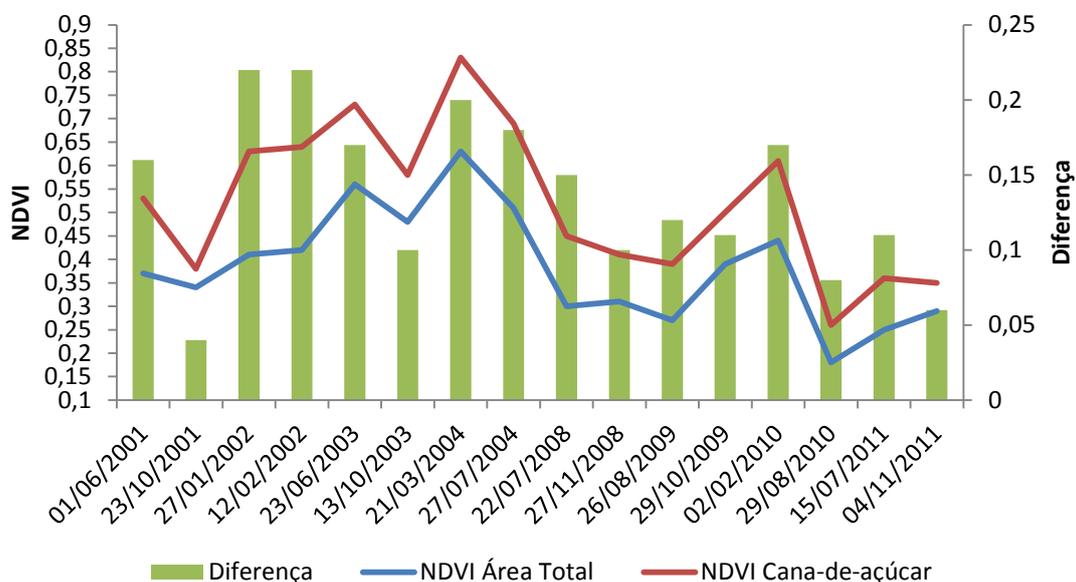
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 22 - Valores de NDVI no noroeste paulista para o período de 2008 a 2011



Fonte: Dados do próprio autor

Figura 23 - Valores médios de NDVI para toda área de estudo e para a cultura da cana-de-açúcar

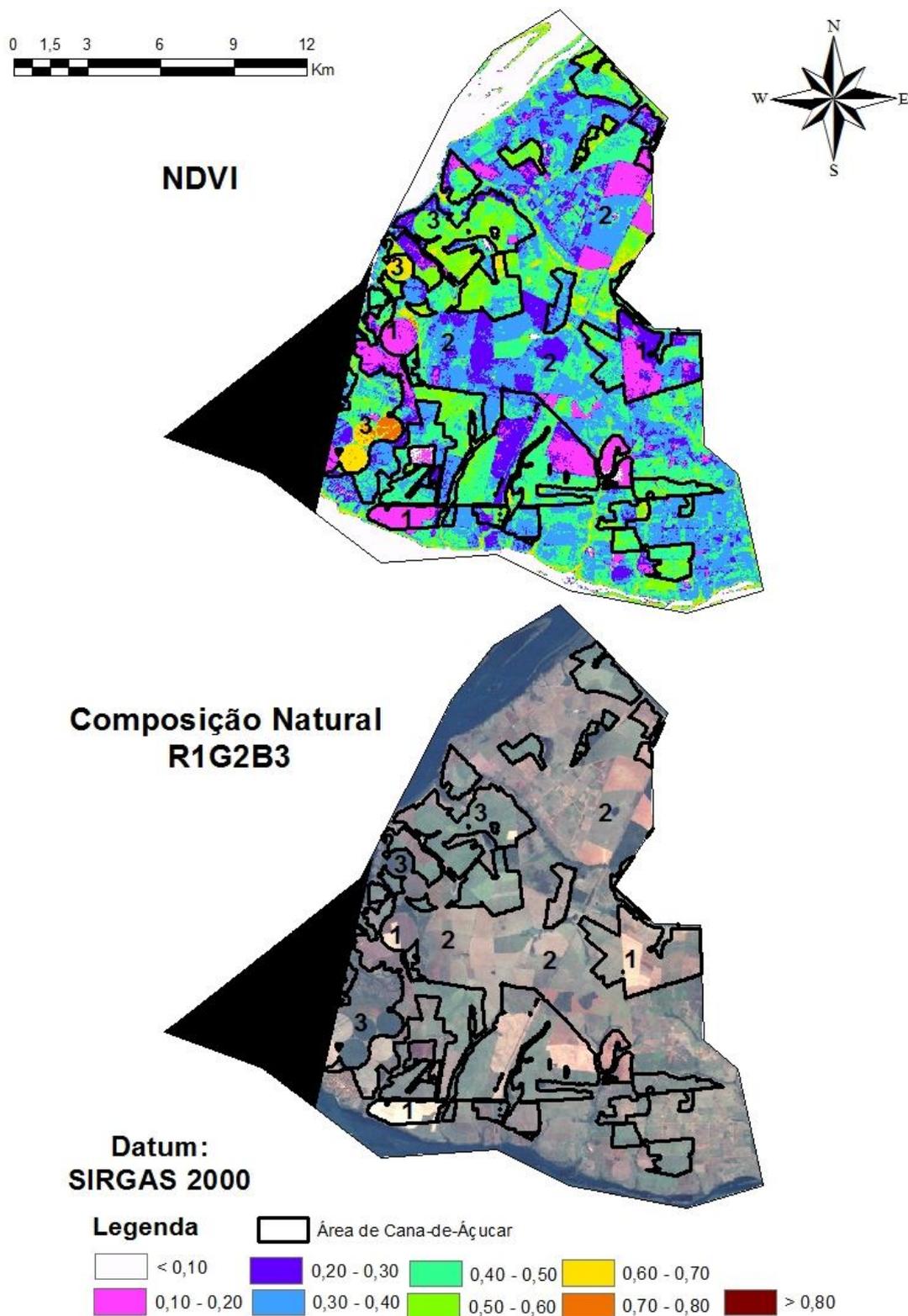


Fonte: Dados do próprio autor

De acordo com a Figura 24 é possível observar que há uma grande diferença entre os valores de NDVI entre as áreas de cana vegetativas, representadas pelo número 3, apresentaram valores acima de 0,5; enquanto as áreas onde a cana já havia sido colhida, marcadas pelo número 1 no mapa, apresentaram valores entre 0,1 e 0,2; valores estes que já eram esperados pois o NDVI é um índice que expressa a intensidade de vegetação, apresentando assim baixos valores em áreas de colheita.

Já os valores da cana não colhida não só apresentaram valores superiores a área de colheita como também as demais áreas, que podemos identificar visualmente pela imagem de composição natural como sendo áreas de pastagem (identificadas no mapa pelo número 2), onde estas apresentam valores que variam de 0,2 a 0,5 variação esta devida aos diferentes estágios de degradação das pastagens. Lima et al. (2013) encontraram valores de NDVI entre 0,46 e 0,55 para pastagens degradadas, valores estes superiores e com um intervalo menos do que os valores que foram encontrados para pastagem na Figura 24, demonstrando que a pastagem dentro da área de estudo apresenta em sua maioria, grande grau de degradação.

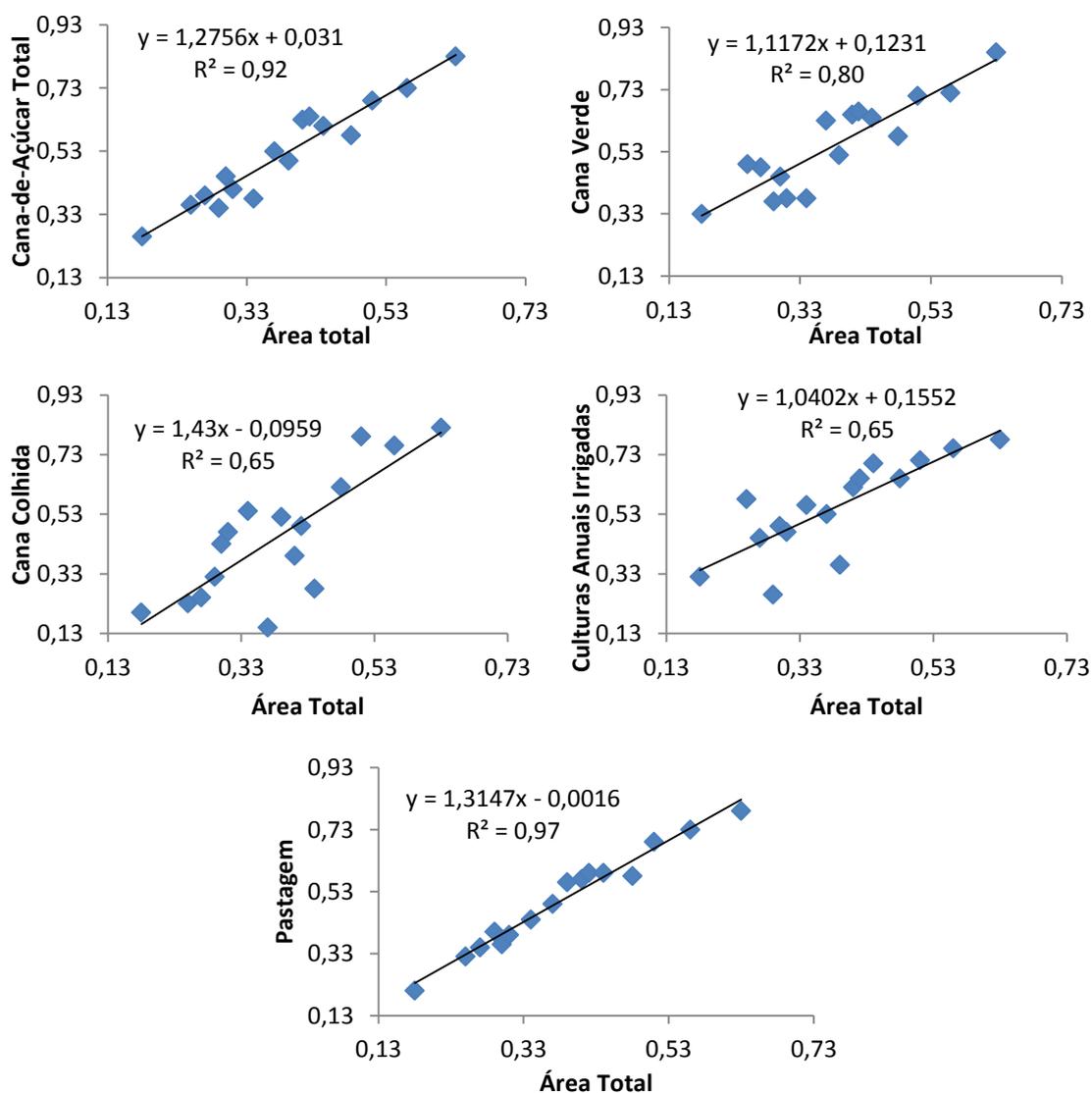
Figura 24 - Mapas de NDVI e composição natural para o município de Itapura na data de 26 de agosto de 2009



Fonte: Dados do próprio autor

Johann, Araújo e Rocha (2009) também encontraram valores médios de NDVI para cana-de-açúcar superior ao de pastagem, onde a cana apresentou uma média de 0,718 enquanto a pastagem de 0,617; valores estes superiores aos encontrados na Figura 24 por representarem uma média para um período de setembro de 2007 a maio de 2008 na região oeste do estado do Paraná, abrangendo assim diferentes períodos hídricos e diferentes estágios das culturas.

Figura 25 - Dispersão dos valores médios de NDVI para a área total de estudo em relação a diferentes classes de uso e ocupação do solo



Fonte: Dados do próprio autor

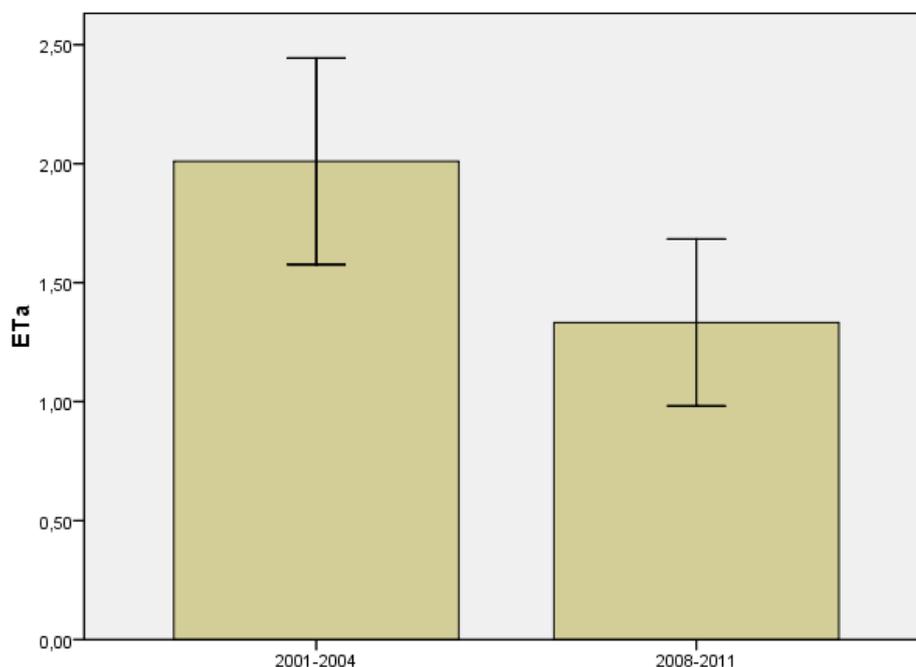
Dessa forma verifica-se que a diminuição entre os valores médios de NDVI para o segundo período de 2008 a 2011 sofre influência das áreas de cana-de-açúcar que por sua vez, tem seus valores influenciados pelas áreas de colheita, de plantio e reforma,

áreas estas que por não possuírem vegetação, apresentam valores muito baixos de NDVI.

De acordo com a Figura 25, ao observar a dispersão entre os valores médios de toda a área de estudo, com o valor médio de algumas classes de uso do solo, as áreas de pastagem foram as que apresentaram a maior relação entre as médias, com um valor de R^2 de 0,97 seguindo das áreas de cana-de-açúcar com um valor de R^2 0,92. Esses resultados indicam que além da cana-de-açúcar, a pastagem também interferiu diretamente na diminuição dos valores de NDVI para a área total de estudo no segundo período.

Avaliando os dados de ETa observa-se que este obteve uma média para o período geral de $1,67 \text{ mm dia}^{-1}$ apresentando valor máximo de $3,08 \text{ mm dia}^{-1}$ em 21 de março de 2004, mesma data que apresentou o valor máximo de NDVI com 0,63. Já o valor mínimo de ETa ocorreu no dia 29 de agosto de 2010 com $0,55 \text{ mm dia}^{-1}$ mesma data onde também ocorreu o valor mínimo de NDVI com 0,18.

Figura 26 - Valores médios de ETa para o noroeste paulista



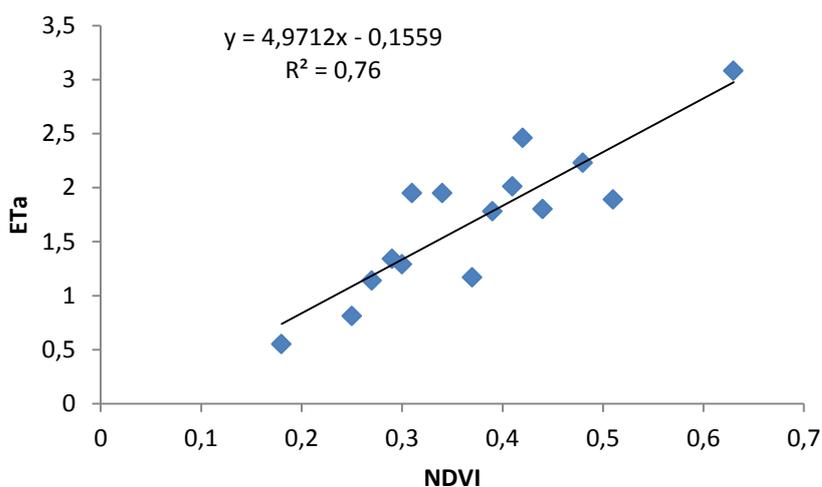
Fonte: Dados do próprio autor

Analisando os dados para os dois períodos de ocupação da cana-de-açúcar, verifica-se que para o primeiro período de 2001 a 2004, a evapotranspiração atual apresentou uma média de $2,01 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto que para o segundo período a média

foi de $1,33 \text{ mm dia}^{-1}$, porém apesar de demonstrar uma redução expressiva, esta não chegou a ser estatisticamente diferente segunda a Figura 26.

No entanto apesar de não apresentar diferença estatística, o comportamento de redução dos valores médios de ET_a é justificado pela Figura 27, pelos valores de NDVI, conclusão esta que fica evidente ao se verificar a dispersão entre estas variáveis, que apresentou um R^2 de 0,76.

Figura 27 - Dispersão entre as médias de ET_a e NDVI

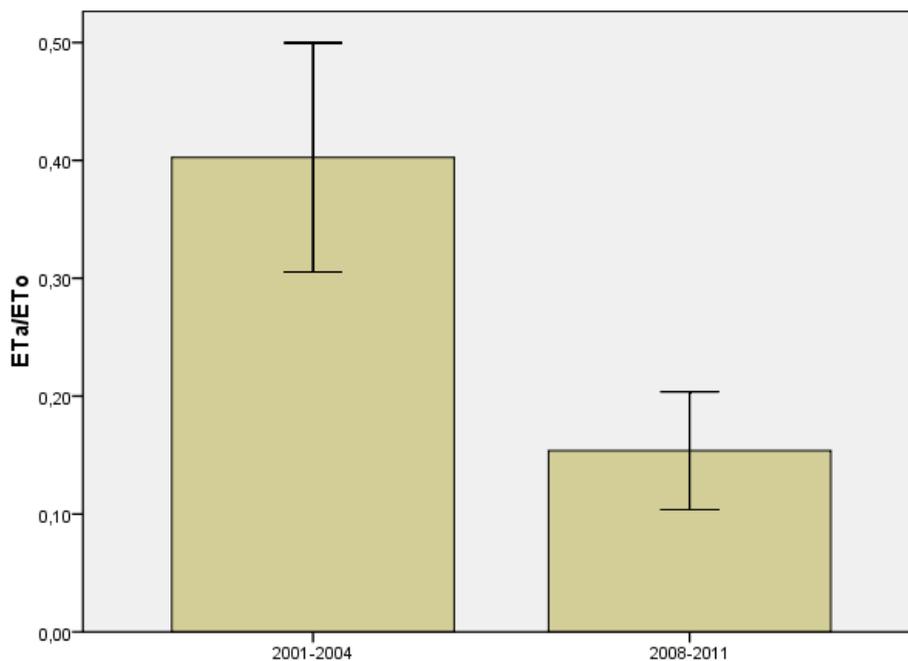


Fonte: Dados do próprio autor

Os dados de ET_a/ET_0 apresentados na Tabela 9, demonstram que entre todo o período avaliado a média obtida foi de 0,28 enquanto que o valor mais baixo encontrado foi de 0,03 no dia 29 de agosto de 2010, sendo este valor justificado por esta data apresentar um período de 113 dias sem chuva maior que 10 mm (Tabela 10), onde a restrição hídrica diminui o valor de ET_a que apresentou o seu valor mínimo nesta mesma data e conseqüentemente diminui o valor de ET_a/ET_0 , sendo 0,61 o valor máximo da relação que foi obtido em 21 de março de 2004, valor este justificado pelo máximo valor de NDVI encontrado na mesma data.

Avaliando os dados de antes e depois da expansão da cana-de-açúcar, observa-se que houve uma diminuição desta relação, onde a média para o período de 2001 a 2004 foi de 0,40 enquanto que de 2008 a 2011, compreendida ao período de expansão da cana-de-açúcar na região, a média de ET_a/ET_0 reduziu para 0,15 sendo esta diminuição estatisticamente diferente segundo a Figura 24.

Figura 28 - Valores médios de ET_a/ET_0 no noroeste paulista



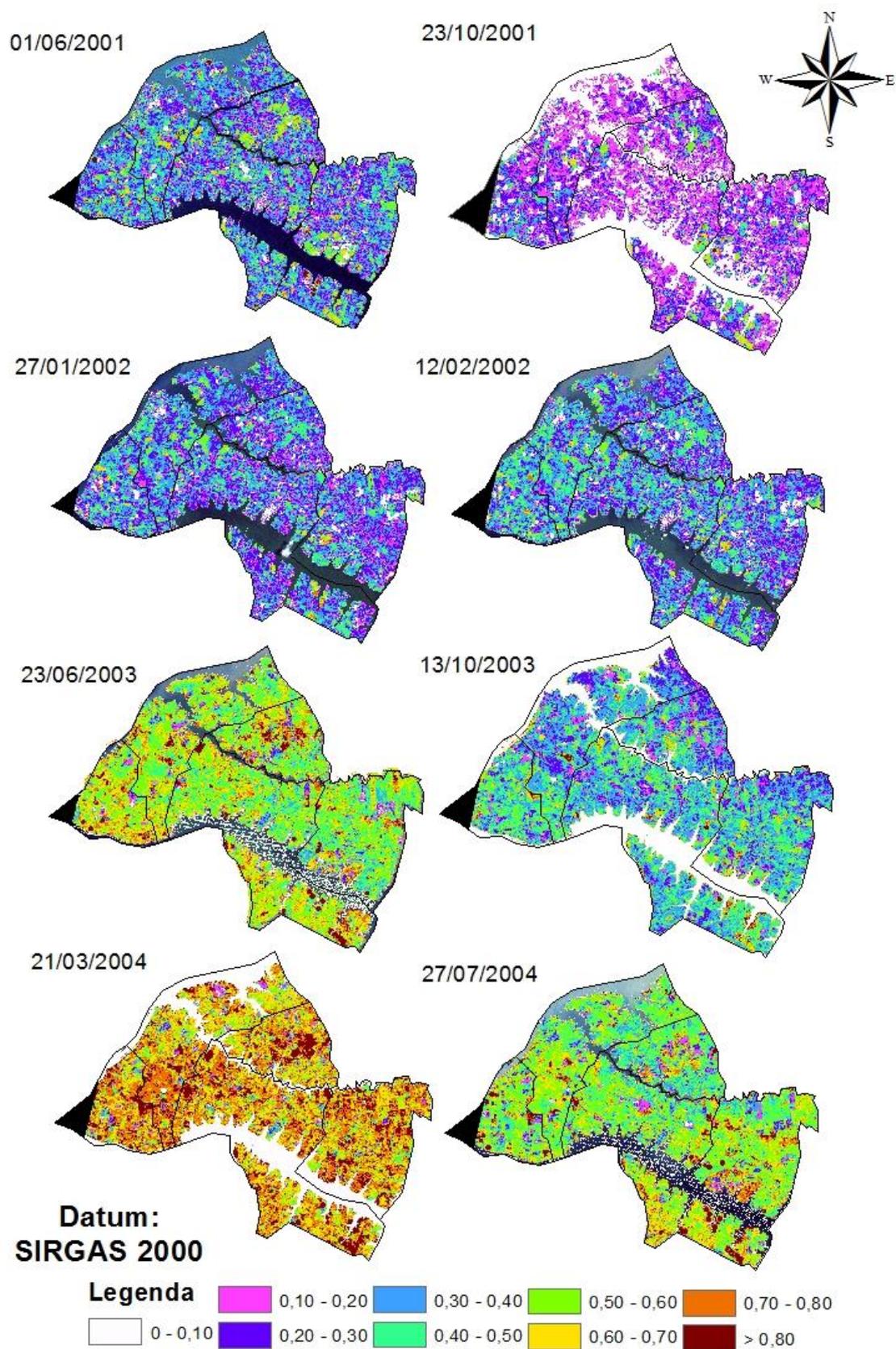
Fonte: Dados do próprio autor

Este comportamento mostrou-se contrário ao esperado, tendo em vista que segundo Alencar *et al.* (2009) o K_c utilizado para a irrigação em pastagem é de 0,80; enquanto segundo Dalri e Cruz (2008) a cana-de-açúcar apresenta K_c superior a 0,80 a partir dos 91 dias de idade, o que levaria a se esperar um valor de ET_a/ET_0 médio maior após a expansão da cana.

Contudo, a cana cultivada na área de estudo não foi irrigada e os coeficientes de cultura, via de regra são determinados em condições ótimas de umidade no solo e representando a condição potencial, já os valores relatados neste trabalho referentes a relação ET_a/ET_0 são os atuais ou reais, representando a condições de restrição hídrica que o solo se encontrava na passagem do satélite. Também o resultado obtido é justificado pela interferência das áreas de colheita e de exposição do solo dentro das áreas de cana.

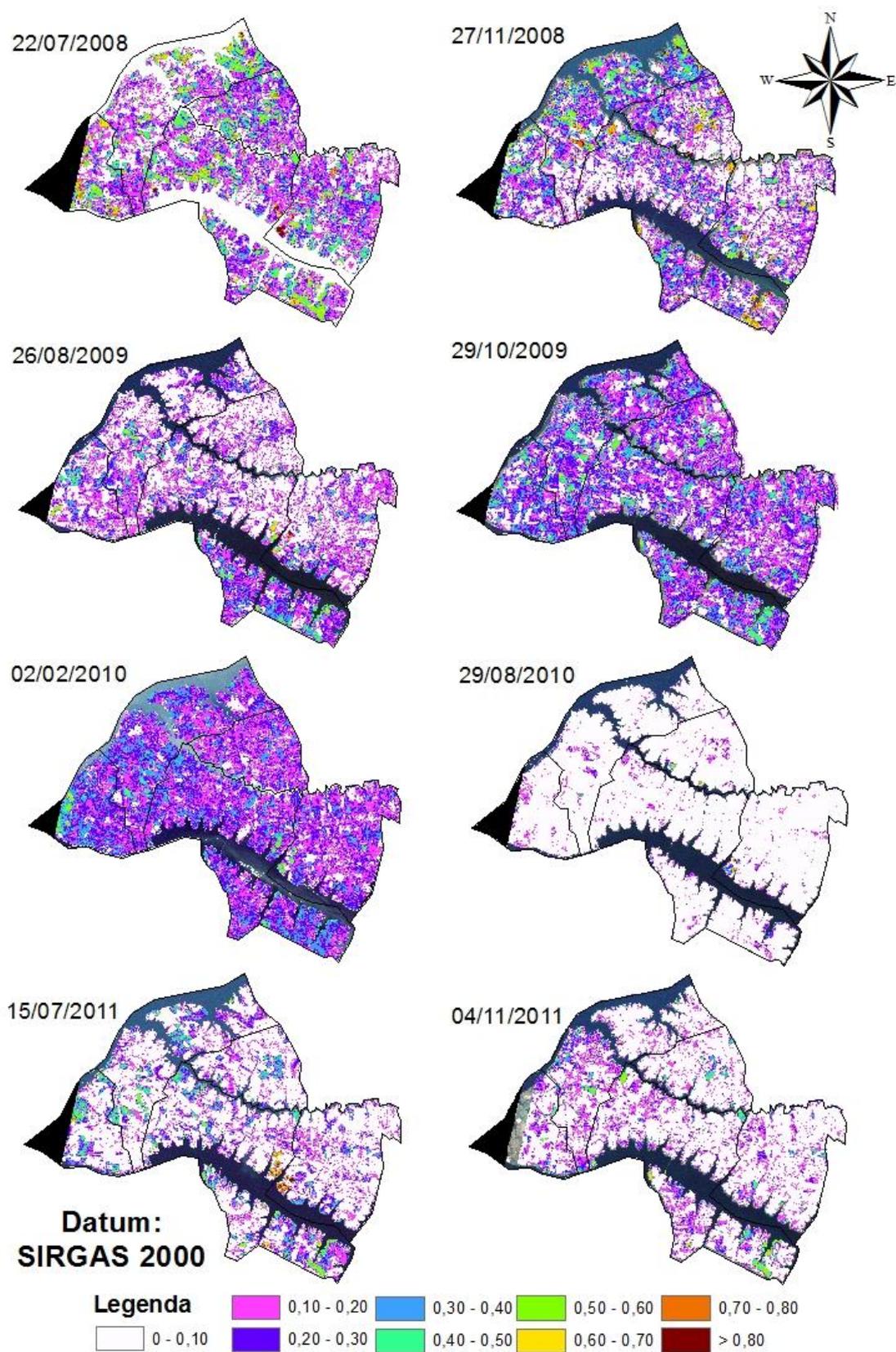
A Figuras 29 e 30 demonstram que mesmo nas datas que apresentaram os valores médios mais baixos, como em 29 de agosto de 2010, é possível observar áreas que na maioria das datas apresentam valores maiores do que os encontrados na área predominante da região de estudo.

Figura 29 - Valores de ET_a/ET_0 no noroeste paulista para o período de 2001 a 2004



Fonte: Dados do próprio autor

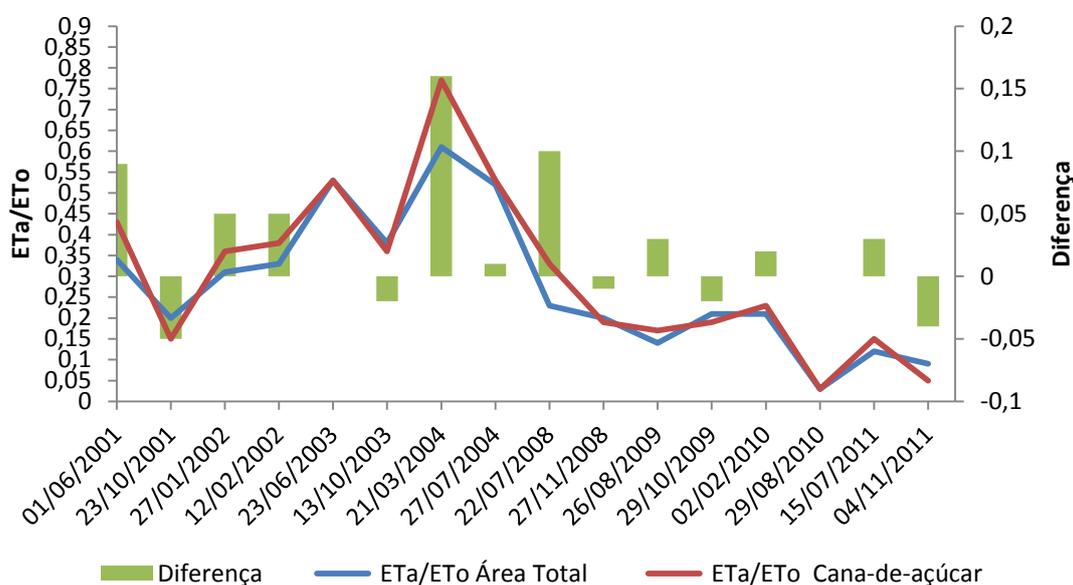
Figura 30 - Valores de ETa/ET0 no noroeste paulista para o período de 2008 a 2011



Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 31 é possível observar que os valores médios de ETa/ET_0 para a cana-de-açúcar acompanham ao longo do período os valores médios para toda a área de estudo, porém ocorre uma variação no comportamento entre as médias, onde em algumas datas a média da área de cana-de-açúcar apresenta maior valor em relação a área total de estudo e em outras datas ocorre o contrário, sendo que a maior diferença encontrada ocorreu no dia 21 de março de 2004 com uma diferença de 0,15.

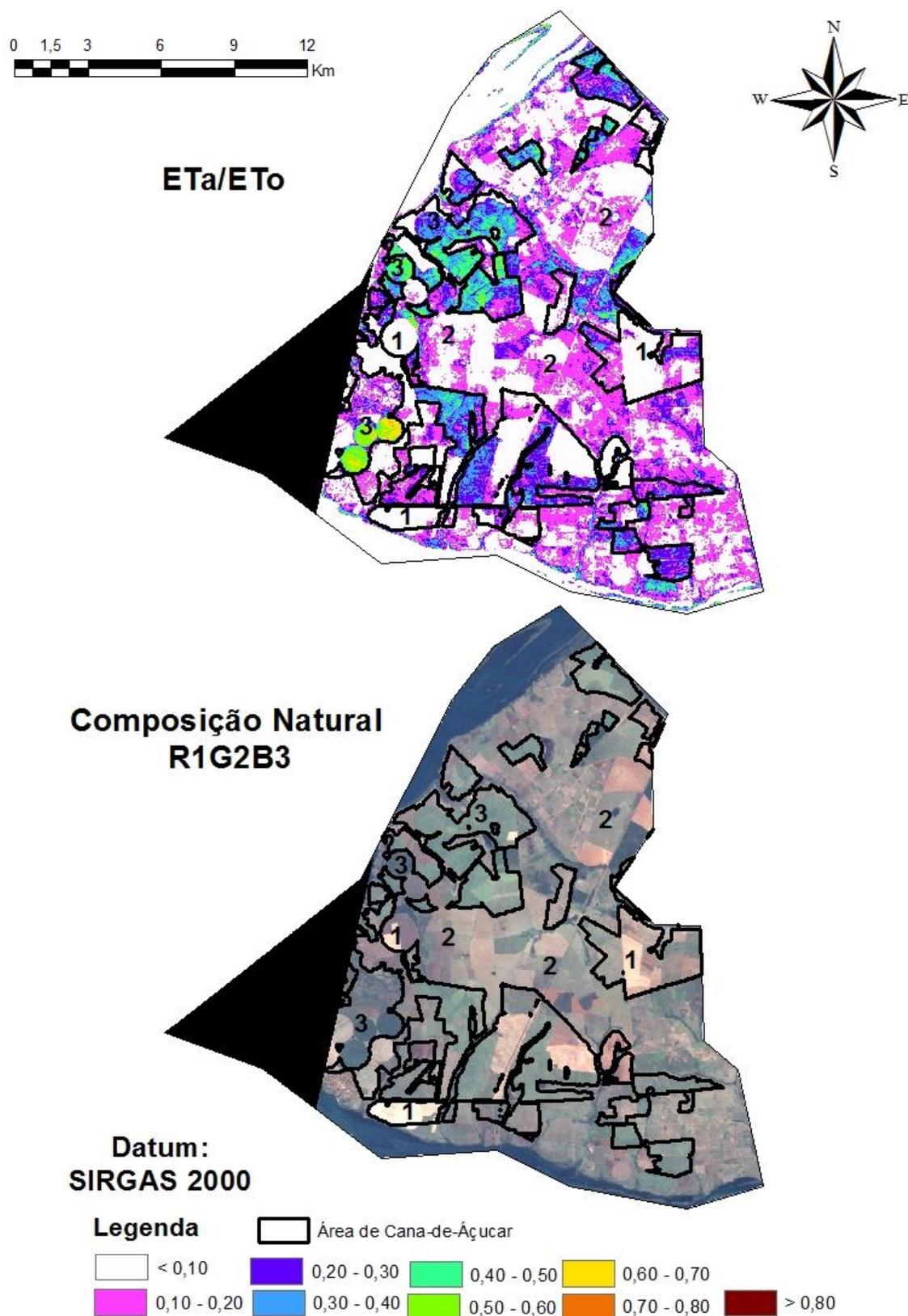
Figura 31 - Valores médios de ETa/ET_0 para toda área de estudo e para a cultura da cana-de-açúcar



Fonte: Dados do próprio autor

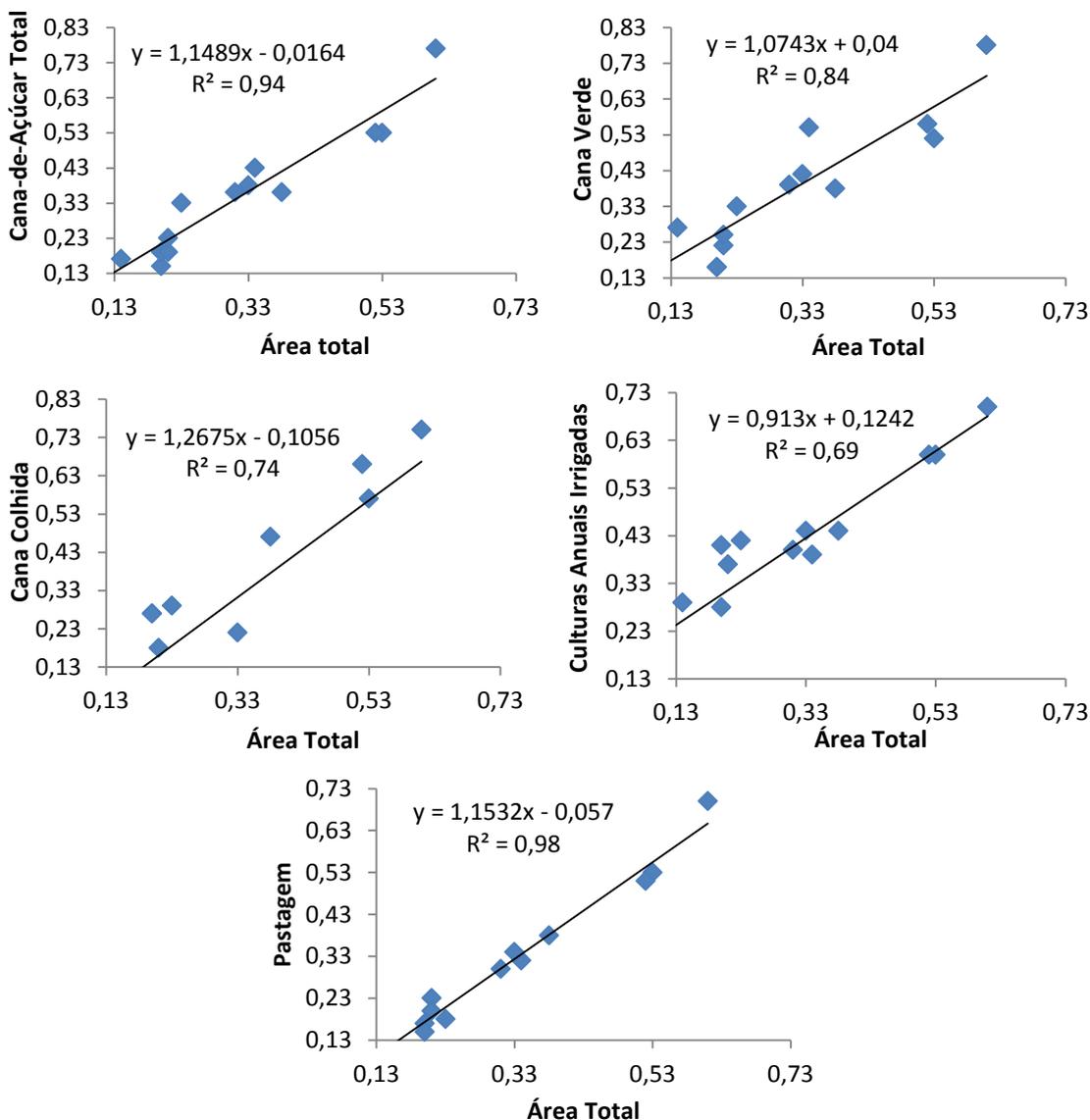
De acordo com a Figura 32 é possível observar para a relação ETa/ET_0 o mesmo comportamento encontrado para NDVI na Figura 24, onde os maiores valores de ETa/ET_0 foram obtidos nas áreas de cana verde (identificados na figura pelo número 3), seguido pelas áreas de pastagem (identificadas pelo número 2 no mapa) e por últimos as áreas de cana colhida, sendo os valores encontrados para cana verde ficaram em torno de 0,30 a 0,50 enquanto os valores das áreas onde a cana já havia sido colhida (identificados na figura pelo número 1) apresentaram valores abaixo de 0,10 onde essa diferença se justifica pelo fato dessas áreas não apresentarem transpiração por plantas e as palhadas que cobrem o solo ainda inibirem a evaporação. Já as áreas ocupadas por pastagem apresentaram valor entre 0,1 e 0,2.

Figura 32 - Mapas de ETa/ET_0 e composição natural para o município de Itapura na data de 26 de agosto de 2009



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 33 - Dispersão dos valores médios de ET_a/ET_0 para a área total de estudo em relação a diferentes classes de uso e ocupação do solo

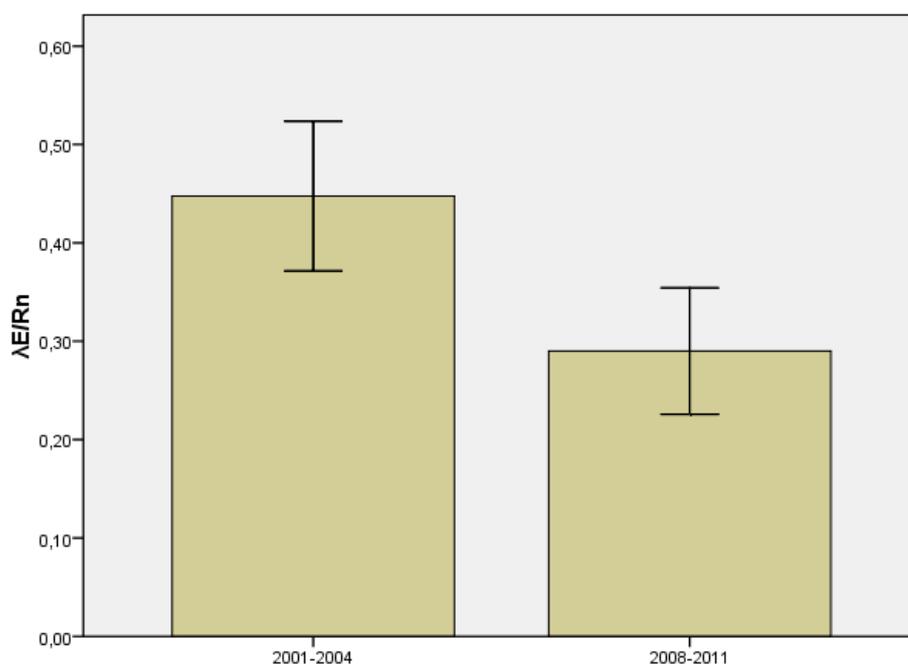


Fonte: Dados do próprio autor.

Na Figura 33 é possível observar que ao relacionar as médias da área total com outras classes de uso e ocupação do solo, encontramos para ET_a/ET_0 o mesmo resultado encontrado para NDVI, onde os valores médios de pastagem foram os mais próximos dos valores médios para a área total, onde o valor de R^2 foi de 0,98 seguido pelos valores das áreas de cana-de-açúcar com um R^2 de 0,94. Esse resultado demonstra a tanto os valores médios das áreas de pastagem quanto das áreas de cana-de-açúcar, influenciaram diretamente na diminuição dos valores médios de ET_a/ET_0 no segundo período.

Pelos dados da razão de fluxo de calor latente pelo Saldo de Radiação ($\lambda E/R_n$) contidos na Tabela 9 é possível observar para todo o período uma média de 0,37 enquanto que ao observar os dados separadamente para os dois períodos de avaliação, é possível verificar que estes apresentaram uma diminuição para o segundo período, passando de uma média de 0,45 para 0,29 representando uma redução de 36% para o período de 2008 a 2011 em relação ao primeiro período, redução esta que segundo a Figura 34 se mostrou estatisticamente diferente. Essa diferença pode ser observada nas Figuras 35 e 36, sendo possível observar o predomínio dos valores médios com a ocorrência de áreas que apresentam constantemente valores superiores a média.

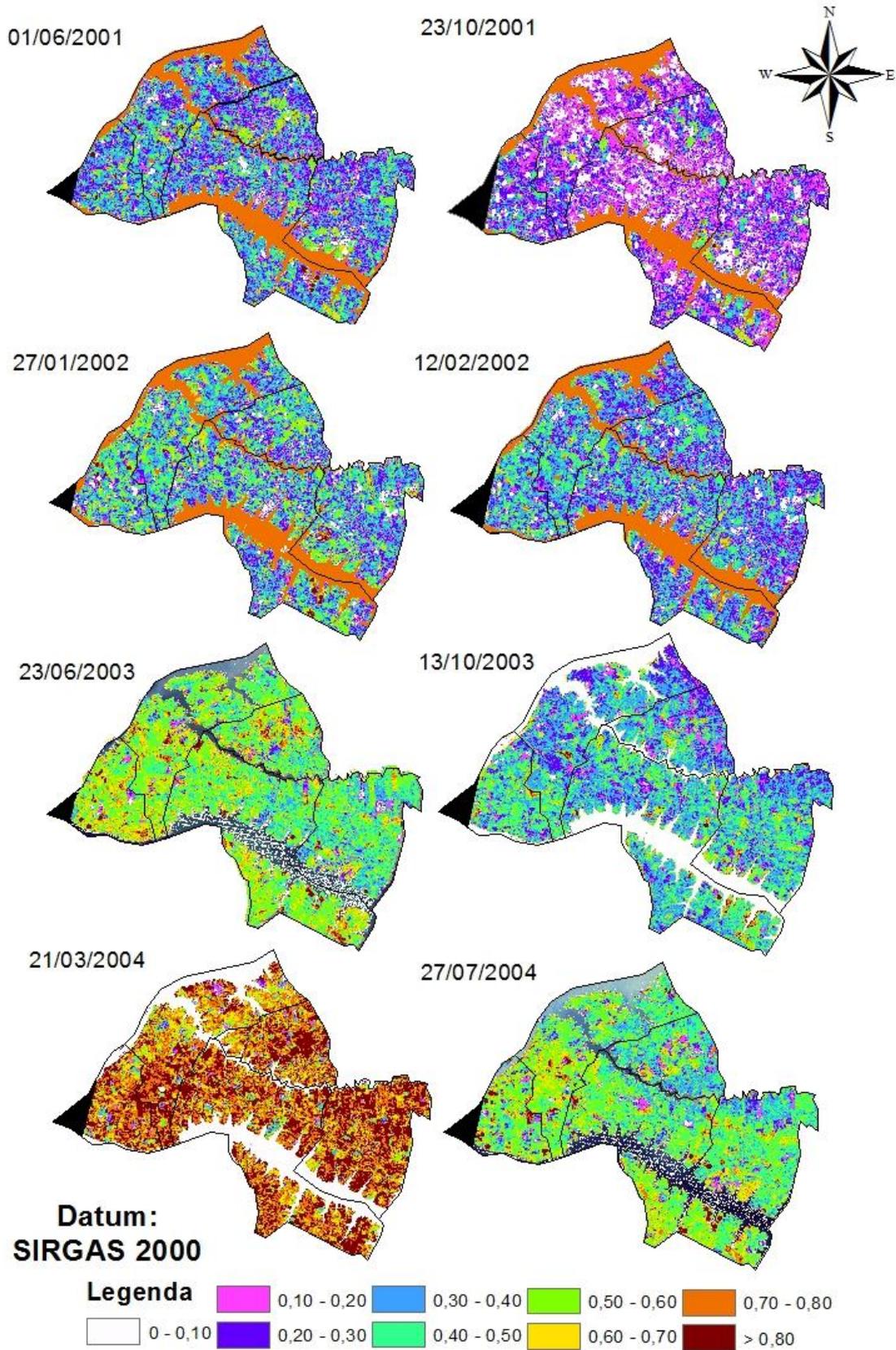
Figura 34 - Dados médios de $\lambda E/R_n$ para o noroeste paulista.



Fonte: Dados do próprio autor.

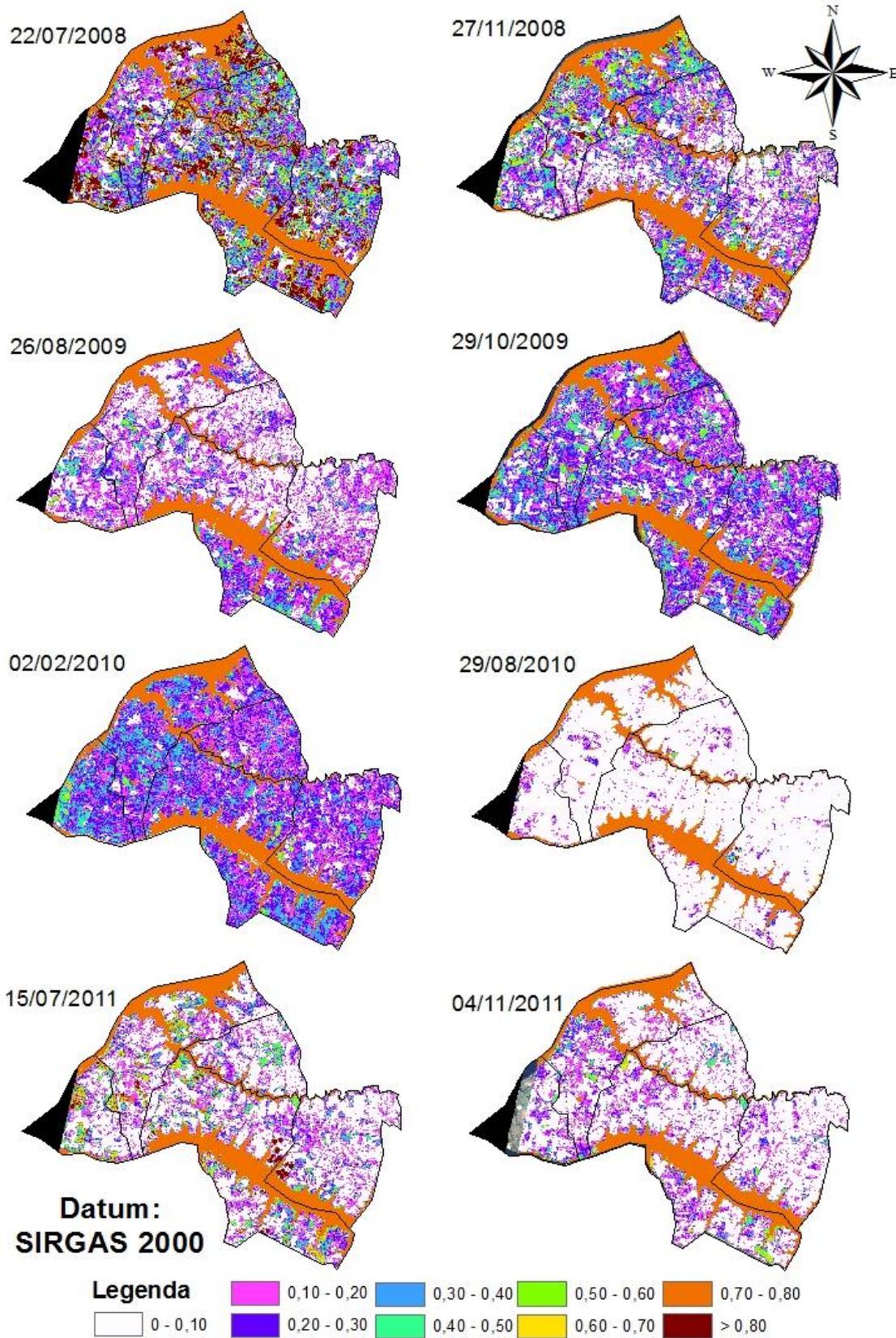
Na Figura 37 pode-se observar que apenas nas datas de 01 de junho de 2001, 21 de março de 2004 e 22 de julho de 2008 os valores médios de $\lambda E/R_n$ para a cultura da cana-de-açúcar, ultrapassaram os valores médios de toda a área de estudo, sendo que a partir de 2008 houve uma forte diminuição nos valores médios de $\lambda E/R_n$, tanto para a área total quanto para as áreas de cana-de-açúcar, demonstrando assim uma forte relação entre os dados médios das áreas de cana com os valores médios de toda a área.

Figura 35 - Valores de $\lambda E/R_n$ no noroeste paulista para o período de 2001 a 2004



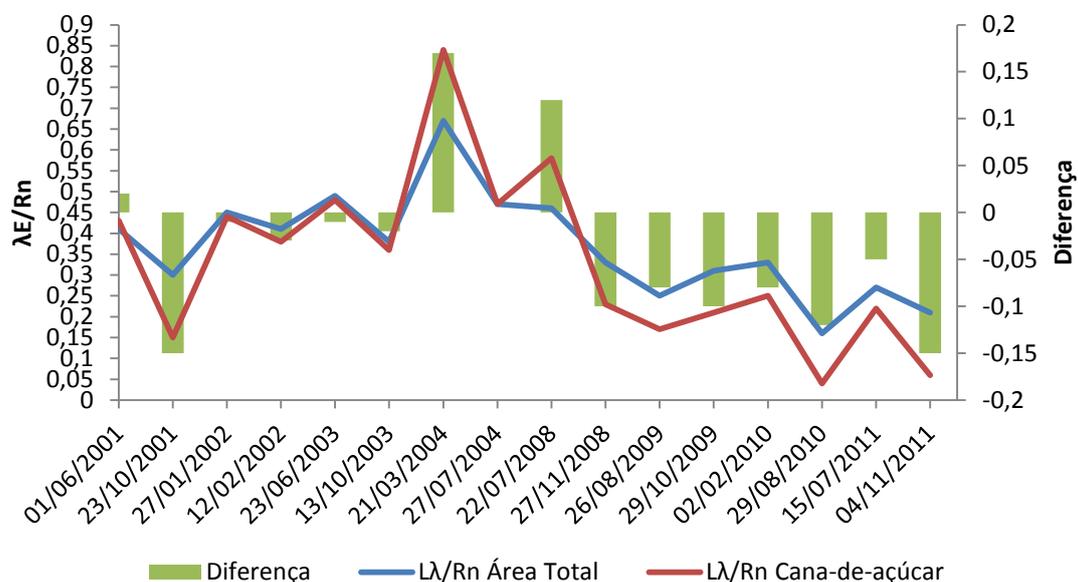
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 36. Valores de $\lambda E/R_n$ no noroeste paulista para o período de 2008 a 2011



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 37 - Valores médios de $\lambda E/R_n$ para toda área de estudo e para a cultura da cana-de-açúcar



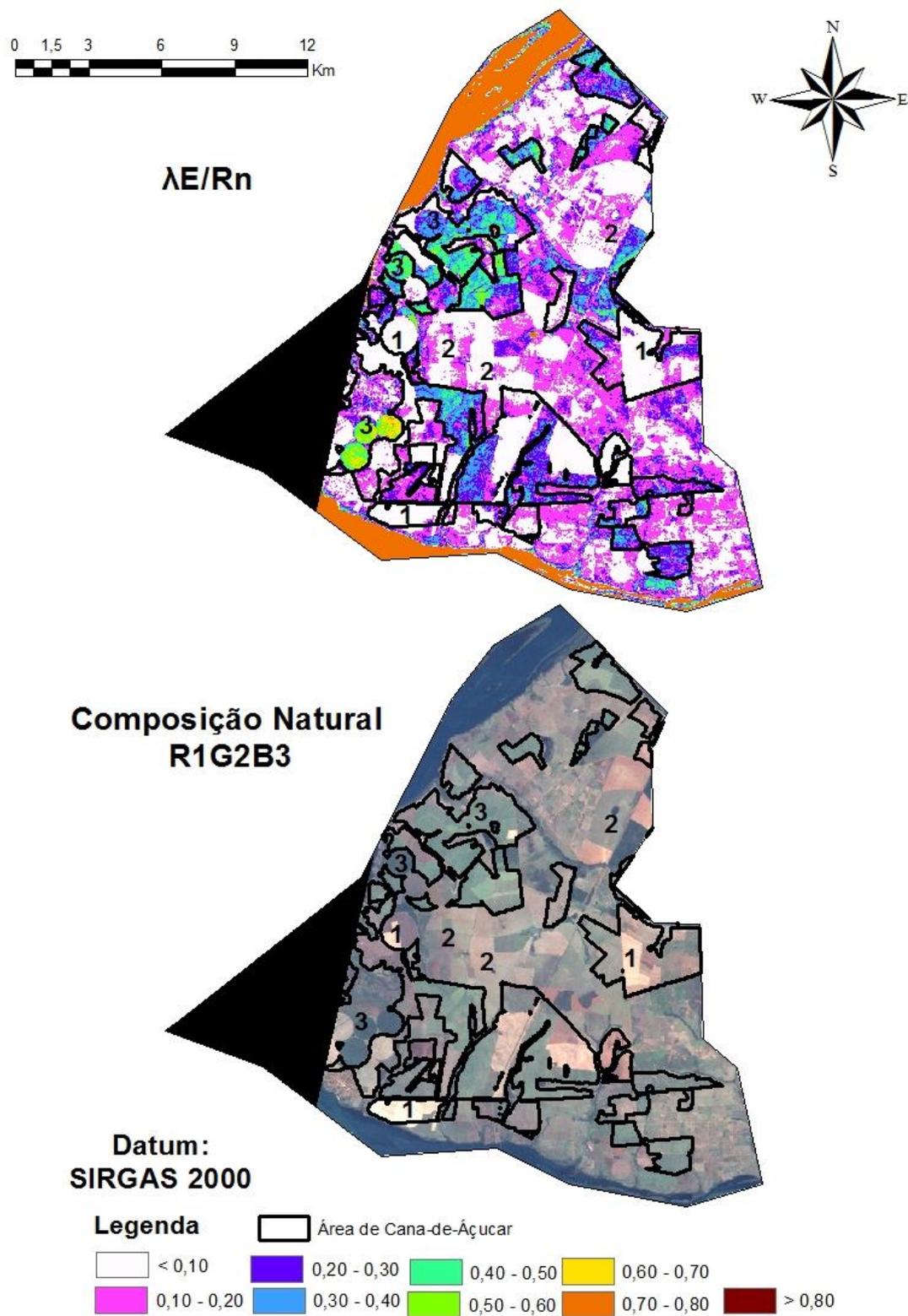
Fonte: Dados do próprio autor.

Observando a Figura 38 percebe-se que as áreas identificadas pelo número 1 correspondem as áreas onde a cana foi ou esta sendo colhida, estas áreas apresentaram valores abaixo de 0,1 para a razão entre fluxo de calor latente e saldo de radiação, isto significa que nestas áreas menos que 10% do saldo de radiação esta sendo utilizado no processo de evaporação da água, o que demonstra que a superfície se encontra com menos umidade devido a ausência de plantas e cobertura do solo pela palhada.

Já as áreas identificadas pelo número 3 que correspondem às áreas de cana-de-açúcar verdes apresentaram valores de $\lambda E/R_n$ entre 0,3 e 0,6 ou seja, nessas áreas entre 30 e 60% do saldo de radiação esta sendo gasto com a evaporação da água, valor superior inclusive as áreas de pastagem, identificadas pelo número 2 no mapa, onde o valor de $\lambda E/R_n$ ficou entre 0,0 a 0,2.

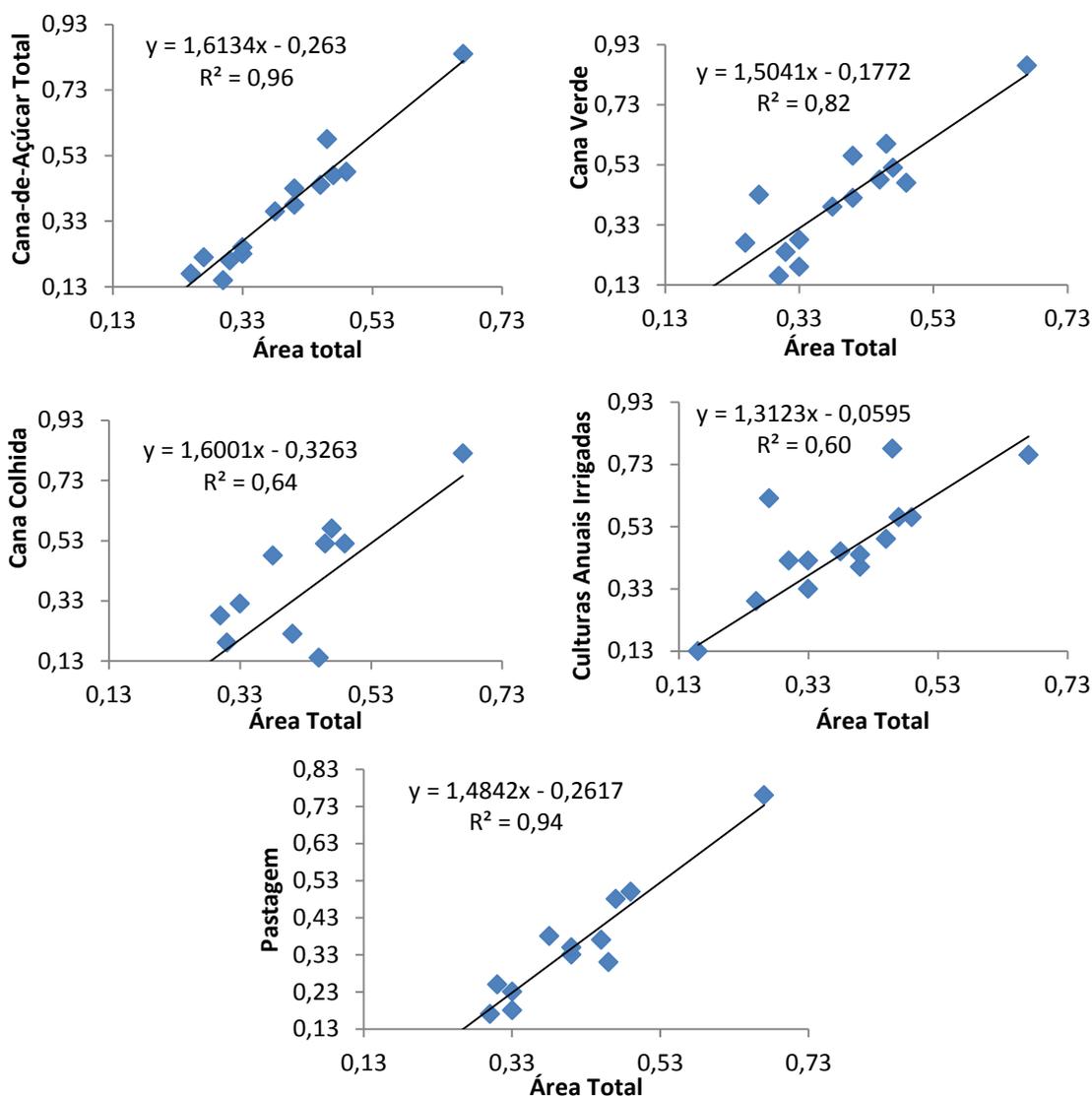
Na Figura 39 observa-se o inverso do encontrado com o NDVI e a relação ET_a/ET_0 , onde para o $\lambda E/R_n$ a cultura da cana-de-açúcar foi a classe de uso e ocupação do solo que apresentou maior relação com os valores médios da área total, apresentando um valor de R^2 de 0,96 enquanto a pastagem que aparece em seguida apresenta um valor de R^2 0,94. Estes resultados demonstram mais uma vez que os valores médios da área total foram influenciados pelos valores médios das áreas de cana-de-açúcar e pastagem.

Figura 38 - Mapas de $\lambda E/R_n$ e composição natural para o município de Itapura na data de 26 de agosto de 2009.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 39 - Dispersão dos valores médios de $\lambda E/R_n$ para a área total de estudo em relação a diferentes classes de uso e ocupação do solo



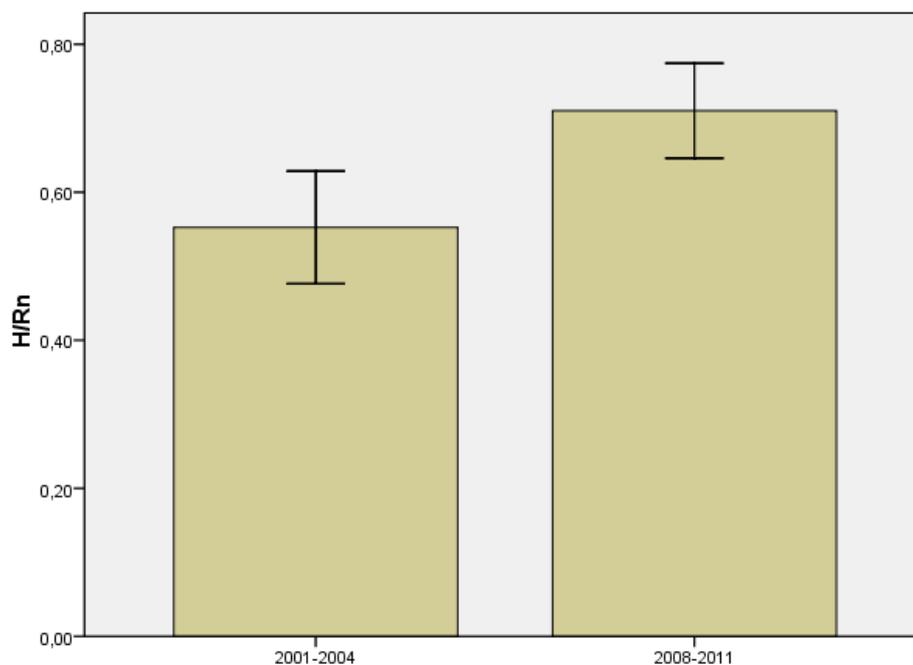
Fonte: Dados do próprio autor.

Os dados da razão entre fluxo de calor latente por saldo de radiação ($\lambda E/R_n$) são inversamente proporcionais aos resultados de fluxo de calor sensível por saldo de radiação (H/R_n). Dessa forma observando os resultados de H/R_n na Tabela 9 verifica-se que para todo o período avaliado a média encontrada foi de 0,63; sendo o valor mínimo de 0,33 no dia 21 de março de 2004. Devido ao fato de H/R_n ser o oposto de $\lambda E/R_n$, a data onde ocorre o valor mínimo de H/R_n , representa também o valor máximo de $\lambda E/R_n$ com 0,67 sendo que o mesmo ocorre com o dia 29 de agosto de 2010, onde enquanto ocorreu a o valor máximo de foi de H/R_n que foi de 0,84 o valor mínimo de $\lambda E/R_n$ para todo o período foi de 0,16.

Como os dados de H/R_n e $\lambda E/R_n$ refletem basicamente as condições de umidade no solo, esses resultados extremos são justificados pela ocorrência de chuvas na região, onde na data de 29 de agosto de 2010 a região se encontrava com 113 dias sem chuva (Tabela 10), fazendo com que com pouca umidade no solo 84% do saldo de radiação fosse utilizado no fluxo de calor sensível e apenas 16% no fluxo de calor latente. Já a data de 21 de março de 2004, apesar de apresentar 7 dias sem chuva maior que 10 mm, com a última ocorrência de 17 mm, esta data apresentou o maior valor de NDVI indicando que a vegetação se encontrava predominantemente verde, permitindo que 67% do saldo de radiação fosse utilizado no fluxo de calor latente provocando a evaporação da água seja por meio da evaporação do solo ou transpiração das plantas.

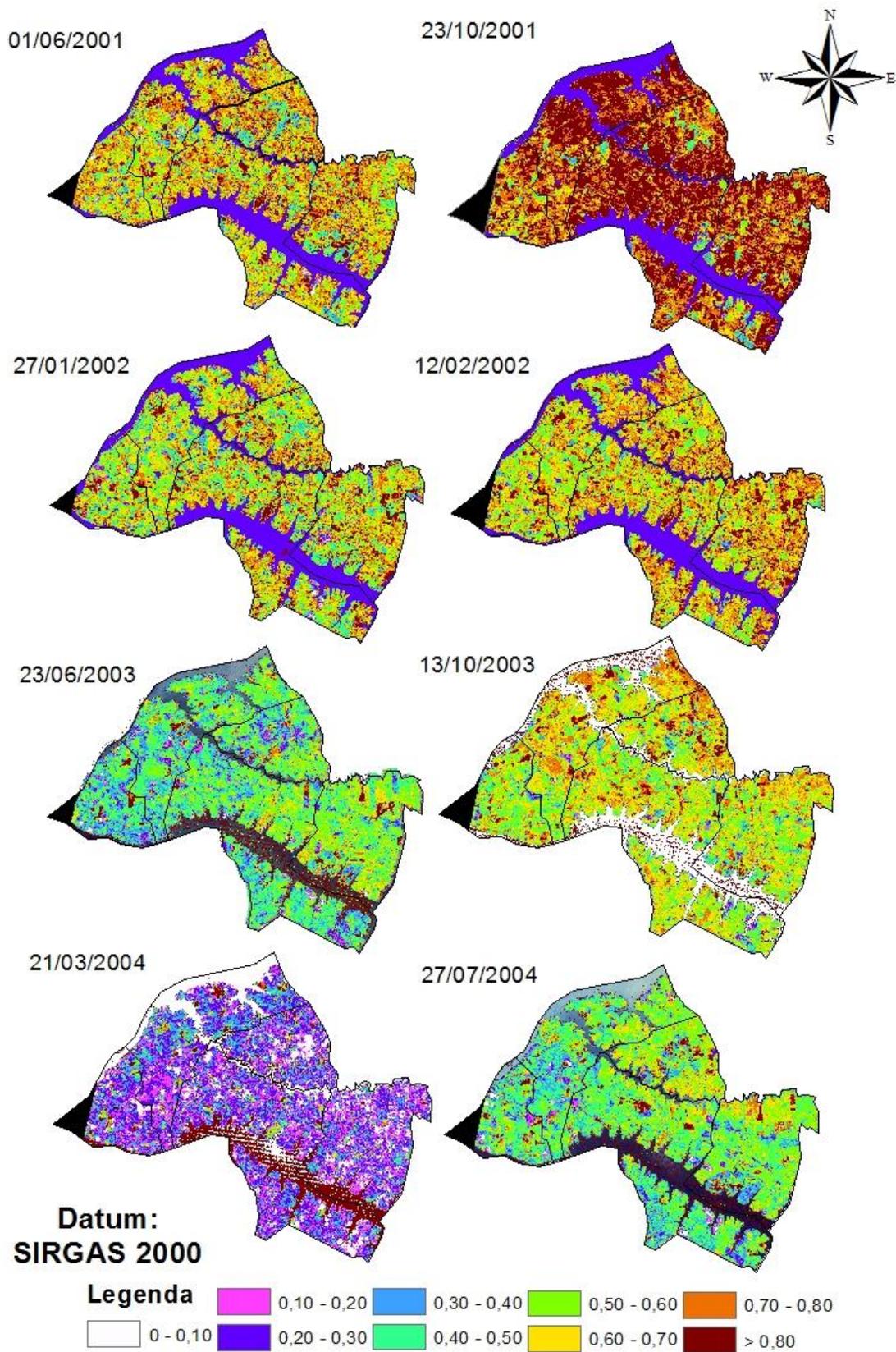
Seguindo o mesmo raciocínio, como houve uma diminuição nos valores de $\lambda E/R_n$ entre o primeiro e o segundo período, houve então um aumento nos valores de H/R_n no segundo período em comparação ao primeiro, onde no período de 2001 a 2004 a média obtida foi de 0,55 enquanto para o período de 2008 a 2011 a média passou para 0,71 ocorrendo um aumento de 29% em relação ao primeiro período, sendo essa diferença estatisticamente diferente de acordo com a Figura 40.

Figura 40 - Dados médios de H/R_n para o noroeste paulista



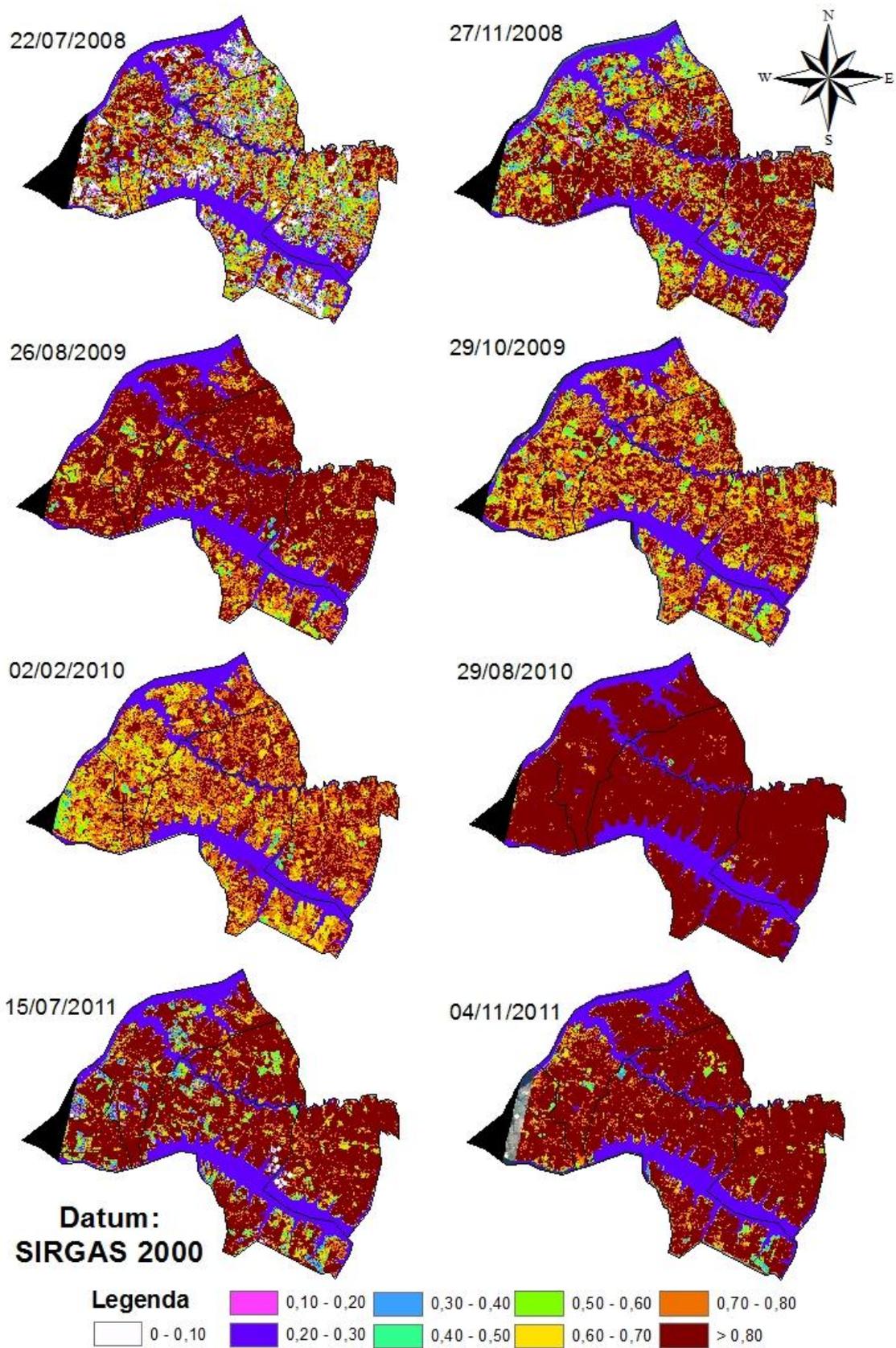
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 41 - Valores de H/Rn no noroeste paulista para o período de 2001 a 2004



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 42 - Valores de H/Rn no noroeste paulista para o período de 2008 a 2011



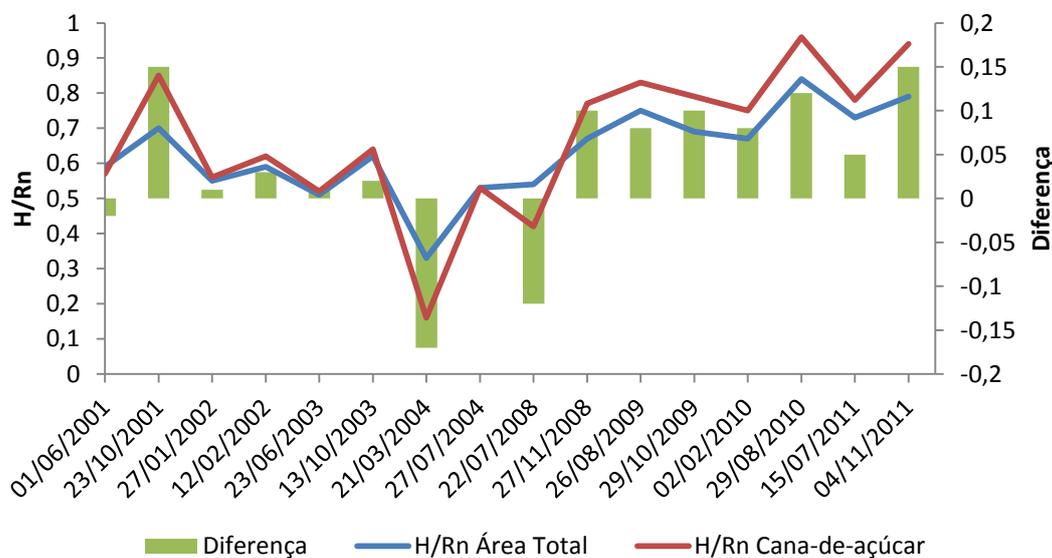
Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 42 é possível observar que na data 29 de agosto de 2010 praticamente toda a área de estudo apresenta o valor médio, já nas demais datas tanto na Figura 42 quanto na Figura 41 apresentam áreas que distinguem do valor médio obtido para cada data, sendo muito dessas áreas equivalentes a áreas de cana-de-açúcar, tendo em vista que esta cultura apresentou uma média diferente da média da área total como pode ser observado melhor na Figura 43.

Na Figura 43 é possível observar o comportamento dos valores médios de H/Rn para as áreas de cana-de-açúcar ao longo do período avaliado, onde verifica-se que no primeiro período de 2001 a 2004 apenas em duas datas os valores de H/Rn para as áreas de cana foram menores que os valores médios para toda a área de estudo, com destaque para a data de 21 de março de 2004, onde o valor da área de cana foi de apenas 52% do valor para a área total, sendo esta diferença explicada pelo alto valor de NDVI encontrado nesta data.

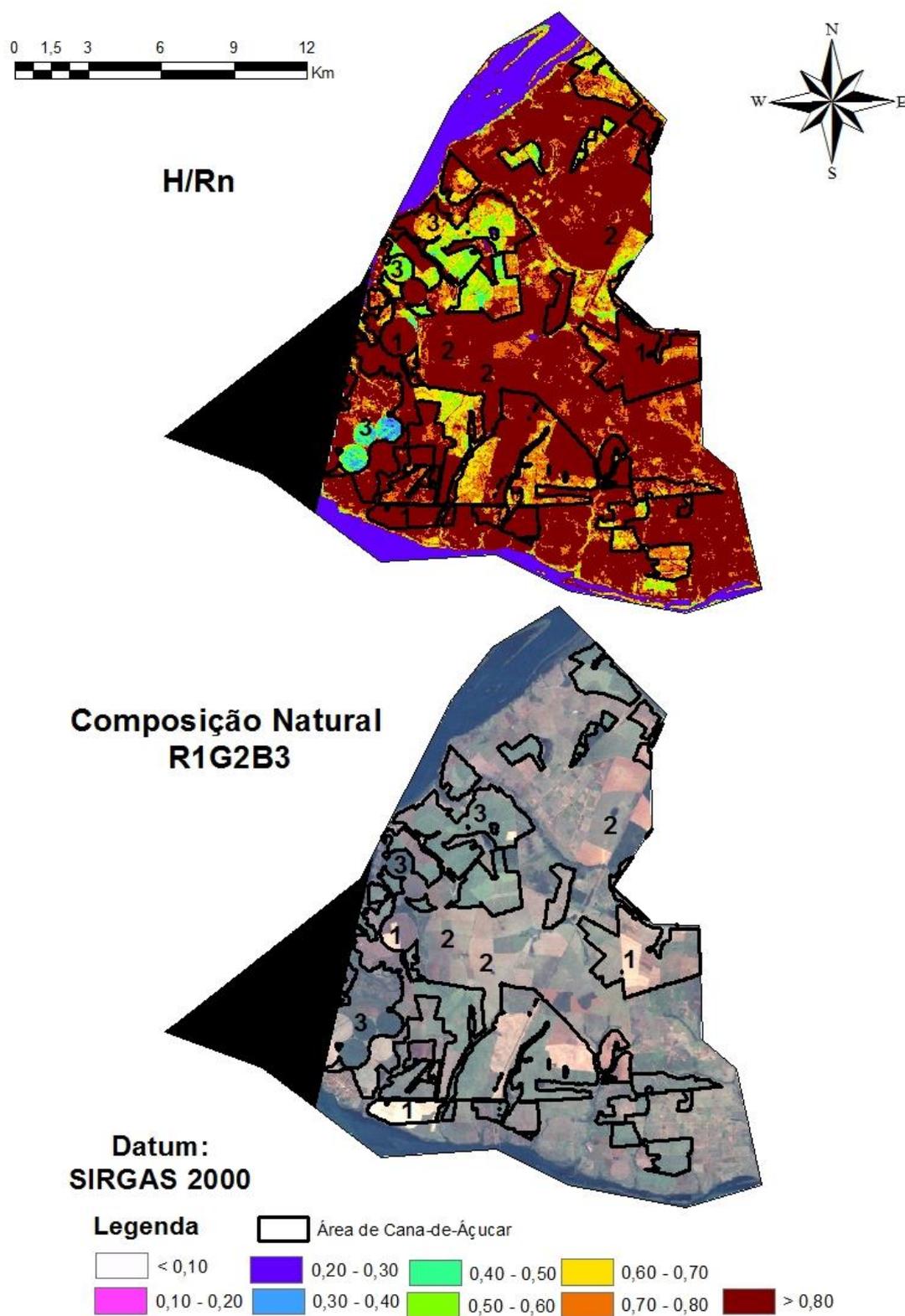
A partir do período de 2008 a 2011, em todas as datas os valores de H/Rn das áreas de cana-de-açúcar se apresentaram menores que os valores da área total, situação esta que pode ser explicada pelo o aumento da área de cana e consequentemente pelo aumento de áreas de colheita e de solo exposto, que conforme a Figura 44 possui maiores valores de H/Rn do que a cultura em estado vegetativo, aumentando assim os valores médios da cultura.

Figura 43. Valores médios de H/Rn para toda área de estudo e para a cultura da cana-de-açúcar



Fonte: Dados do próprio autor.

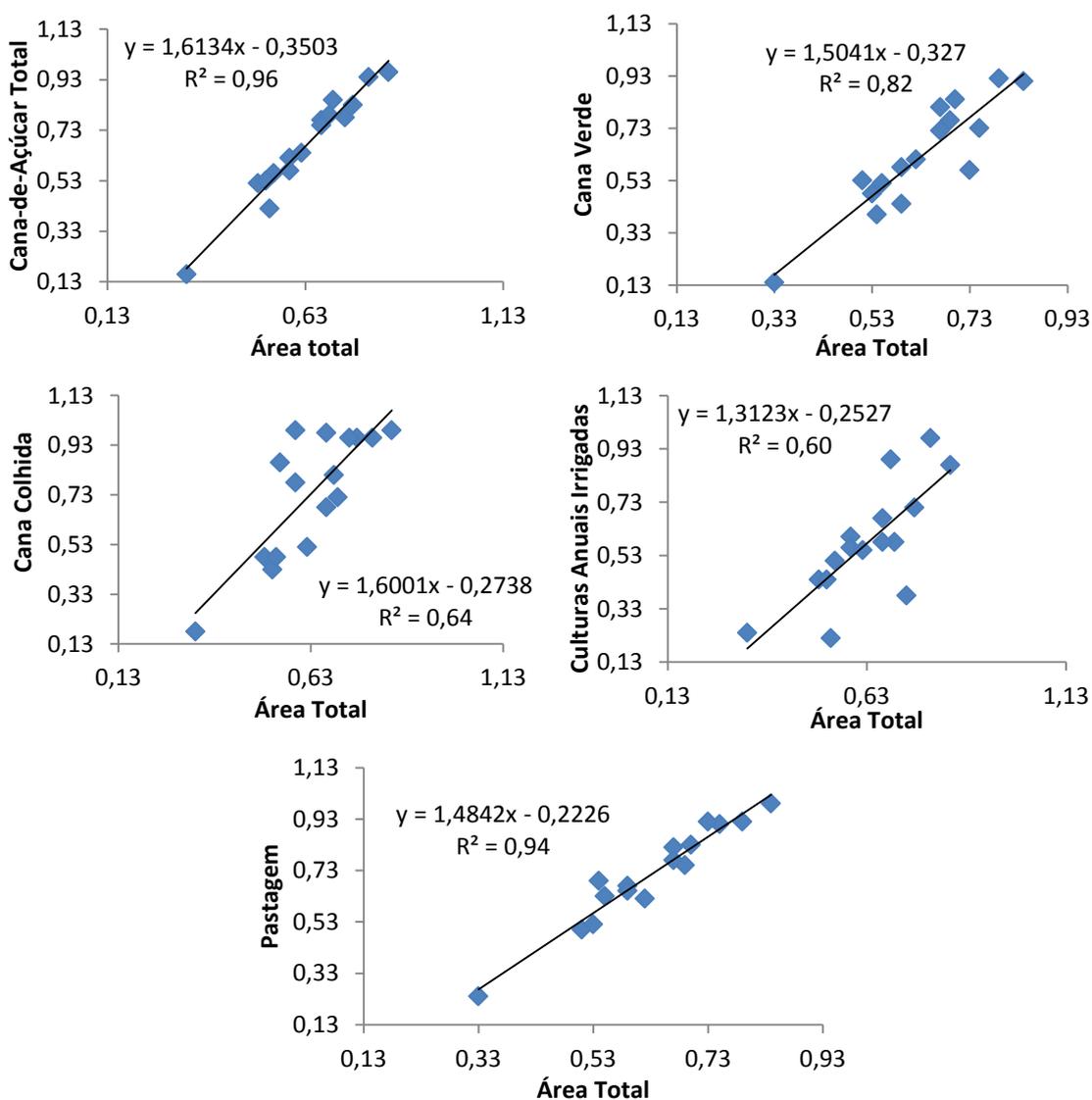
Figura 44. Mapas de H/Rn e composição natural para o município de Itapura na data de 26 de agosto de 2009



Fonte: Dados do próprio autor.

Na Figura 44 é possível observar que às áreas 1 e 2 que correspondem respectivamente as áreas de colheita de cana-de-açúcar e de pastagem apresentaram valores de H/Rn predominantemente acima de 0,60 enquanto os valores da área identificada com o número 3 no mapa, que são ocupadas pelas áreas de cana-de-açúcar verde, apresentaram valores variando entre 0,30 a 0,70. Esses resultados indicam que o aumento dos valores de H/Rn ao longo dos anos não está ligado as áreas de vegetação da cultura da cana-de-açúcar, devendo estar relacionada as áreas de colheita da cultura e as áreas de pastagem.

Figura 45 - Dispersão dos valores médios de H/Rn para a área total de estudo em relação a diferentes classes de uso e ocupação do solo

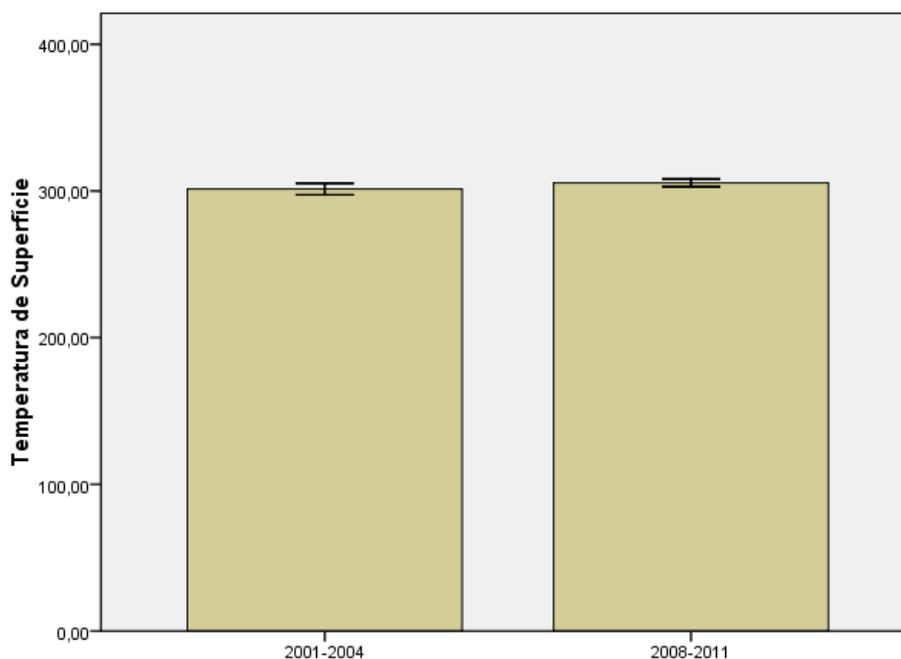


Fonte: Dados do próprio autor.

Avaliando a Figura 45 é possível observar que novamente os valores das áreas da cultura da cana-de-açúcar, juntamente com as áreas de pastagens estão fortemente relacionados aos valores médios de toda a área de estudo, influenciando diretamente no aumento dos valores entre o primeiro para o segundo período.

Avaliando os dados da Temperatura de Superfície na Tabela 9, observa-se que para o período completo de avaliação a média obtida foi de 303,39 K, sendo o valor máximo obtido no dia 27 de janeiro de 2002 com o valor de 308,52 K, enquanto o valor mínimo foi 294,88 K 23 de junho de 2003, valor provavelmente influenciado pelo alto valor de NDVI nesta data indicando uma maior vegetação na área de estudo. Segundo Costa, Silva e Peres (2010) a vegetação reduz a quantidade de radiação solar que incide à superfície, uma vez que parte da radiação solar incidente é absorvida pelas folhas e utilizada para fotossíntese, e outra fração é refletida de volta para a atmosfera, tendo como consequência a diminuição da temperatura da superfície.

Ao avaliar o comportamento da temperatura de superfície ao dividir os dados para os dois períodos de ocupação da cana-de-açúcar, é possível observar que houve um aumento da temperatura, sendo que para o primeiro período a média foi de 301,32 K, enquanto que para o segundo período a média encontrada foi de 305,45 K, apresentando um aumento de 4,13 K, sendo que este aumento justifica-se devido o aumento neste mesmo período da relação H/R_n que provoca aquecimento na superfície por transformar a energia do saldo de radiação em calor (FRANCO et al., 2013). Porém apesar do aumento observado, a diferença encontrada não foi estatisticamente diferente segundo a Figura 46.

Figura 46 - Dados médios de Temperatura de Superfície para o noroeste paulista

Fonte: Dados do próprio autor.

2.3.4 Estimativa do Consumo de Água na região de estudo

Observando os dados da Tabela 11 é possível observar que a média da evapotranspiração atual foi de $1,50 \text{ mm dia}^{-1}$ referentes a todo o período avaliado para toda a área da região de estudo. Ao se obter este valor separadamente para algumas classes de uso e ocupação do solo, observa-se que o maior valor foi de $1,81 \text{ mm dia}^{-1}$, obtido para as culturas anuais irrigadas, resultado já esperado, pois este valor é influenciado diretamente pela umidade do solo, onde as culturas por serem irrigadas, tendem a não sofrer restrições quanto a atender a necessidade hídrica da cultura, proporcionando assim maiores valores de ETa quando comparados a regiões que sofrem com a restrição de água.

O segundo valor mais alto observado foi de $1,64 \text{ mm dia}^{-1}$ obtido para a cana-de-açúcar verde, ou seja, não foram considerados neste caso as áreas de colheita e de solo exposto (cana colhida) que por não possuírem vegetação apresentaram uma ETa média de apenas $1,29 \text{ mm dia}^{-1}$, reduzindo a média geral das áreas de cana-de-açúcar para $1,50 \text{ mm dia}^{-1}$. Já o segundo valor mais baixo de ETa encontrado na separação das classes foi de $1,36 \text{ mm dia}^{-1}$, valor que se demonstra baixo devido ao alto índice de degradação das

pastagens e pela característica de na falta de sistemas de irrigação, cheguem a secar quando sofrem um longo período de restrição hídrica.

Considerando que a área total de estudo é de 280.591 hectares (Tabela 1) e utilizando o valor médio de ETa de 1,73 mm dia⁻¹ referente a média de todo o período avaliado para toda a área de estudo (Tabela 11). Pode-se concluir que a transferência de água para a atmosfera na região de estudo é da ordem de 4.854.224,3 m³/dia.

Ao se refazer essa conta para as áreas ocupadas pela cultura da cana-de-açúcar, utilizando-se o valor de ETa de 1,50 que foi o ETa médio encontrado para área total da cultura, sendo a área de cana-de-açúcar encontrada em 2011 de 72.269 hectares, chega-se que transferência de água para a atmosfera pela cultura da cana-de-açúcar na região de estudo é da ordem de 1.084.035,0 m³/dia, ou seja, a cultura da cana ocupa 25,8% de toda a área de estudo, esta representa apenas 22,3% do consumo de água da mesma região.

Tabela 11. Valores médios de ETa para diferentes classes de uso e ocupação do solo para todo o período de avaliação.

Área Total	Cana-de-açúcar Total	Cana Verde	Cana Colhida	Culturas Anuais Irrigadas	Pastagem
mm dia⁻¹					
1,73	1,50	1,64	1,29	1,81	1,36

Fonte: Dados do próprio autor.

3 CONCLUSÕES

Os dados de Albedo e H/Rn, apresentaram um aumento em seus valores médios para o período de 2008 a 2011, enquanto os dados de NDVI, ETa/ET₀ e λE/Rn e apresentaram uma redução nos valores médios para o mesmo período.

Os valores médios obtidos para a área total de estudo apresenta alta relação entre os valores obtidos para as áreas de cana-de-açúcar e de pastagem, demonstrando que a expansão da cana e a degradação cada vez maior das pastagens estão interferindo no balanço de radiação e energia.

As áreas de cana verde apresentaram menores valores Albedo e H/Rn e maiores valores de NDVI, ETa/ET₀ e λE/Rn quando comparada as áreas de pastagem e de cana

colhida ou com solo exposto. No entanto, a interferência dessas áreas não chega a afetar a macrorregião, interferindo apenas na microrregião de uso e ocupação.

O modelo SAFER apresentou bons resultados para a região do noroeste paulista, porém recomenda-se a calibração regional para os coeficientes das equações relativas ET_a/ET_0 com os parâmetros de sensoriamento remoto.

4 REFERÊNCIAS

- ADAMI, M., MELLO, M.P., AGUIAR, D.A., RUDORFF, B.F.T., SOUZA, A.F.D. A Web Platform Development to Perform Thematic Accuracy Assessment of Sugarcane Mapping in South-Central Brazil. **Remote Sensing**, Basel, v.4, p.3201-3214, 2012.
- ALENCAR, C.A.B.; CUNHA, F.F.; MARTINS, C.E.; CÓSER, A.C.; ROCHA, W.S.D.; ARAÚJO, R.A.S. Irrigação de pastagem: atualidade e recomendações para uso e manejo. **R. Bras. Zootec.**, Viçosa, v.38, p.98-108, jul. 2009.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: **FAO**, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) Advanced Training and Users Manual - Idaho Implementation, version 1.0, 2002. Disponível em: <http://www.dca.ufcg.edu.br/DCA_download/ISR/UFPE/Final%20Sebal%20Manual.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2013.
- ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, IÊDO.; BARBOSA, G.V.S.; FILHO, G.M.; JÚNIOR, R.A.F. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 32, n. 5, p.1441-1448, out. 2008.
- ANDRÉ, R.G.B.; MENDONÇA, J.C.; MARQUES, V.S.; PINHEIRO, F.M.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p.375-382, set. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v25n3/a09v25n3.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2013.
- BACK, A.J. Variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p.139-145, jan/abr. 2007. <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v27n1/07.pdf>>. 18 Fev. 2013.
- BARBOZA JÚNIOR, C.R.A.; FOLEGATTI, M.V.; ROCHA, F.J.; ATARASSI, R.T. Coeficiente de cultura da lima-ácida tahiti no outono-inverno determinado por lisimetria de pesagem em Piracicaba - SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p.691-698, out/dez 2008. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162008000400009&script=sci_arttext>. Acesso em: 01 dez. 2012.

- BORBA, M.M.Z.; BAZZO, A.M. Estudo econômico do ciclo produtivo da cana-de-açúcar para reforma de canavial, em área de fornecedor do estado de São Paulo. **In: SOBER - Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural**, 47., 2009, Porto Alegre. Sober, 2009. p. 1 - 21. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/13/1169.pdf>>. Acesso em: 31 dez. 2013.
- BÍSCARO, G.A. **Meteorologia Agrícola Básica**: Série Engenharia Volume 1. Cassilândia: Gráfica e Editora União Ltda, 2007. 87 p. Disponível em: <<http://www.do.ufgd.edu.br/guilhermebiscaro/arquivos/meteorologia.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2013.
- CAMARGO, A.M.M.P.; CASER, D.V.; CAMARGO, F.P.; OLIVETTE, M.P.A.; SACHS, R.C.C.; TORQUATO, S.A. Dinâmica e tendência da expansão da cana-de-açúcar sobre as demais atividades agropecuárias, estado de São Paulo, 2001-2006. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.38, n.3, p.47-66, mar. 2008.
- CASTANHO FILHO, E.P.; CAMPOS, A.D.C.; ÂNGELO, J.A.; OLIVETTE, M.P.A.; SACHS, R.C.C. A evolução da agropecuária paulista e a implantação da legislação ambiental: impactos socioeconômicos e ambientais. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 43, n. 4, p.5-25, jul/ago. 2013. Disponível em: <<ftp://ftp.sp.gov.br/ftpiea/publicacoes/ie/2013/ie0813.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2013.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing**, Piscataway, v.41, n.11, p.2674-2677, nov. 2003.
- COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L. de. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agrícola**, Salvador, v. 7, n. 1, p.57-60, set. 2005. Disponível em: <http://www.seagri.ba.gov.br/pdf/socioeconomia4_v7n1.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2010.
- COMPAORÉ, H.; HENDRICKX, J.M.; HONG, S.; FRIESEN, J.; GIESEN, N.C. van de; RODRIGUES, C.; SZARZYNSKI, J.; VLEK, P.L.G. Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.33, p.127-140, 2008.
- COSTA, D.F.; SILVA, H.R.; PERES, L.F. Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira - SP através da utilização de geotecnologias. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 5, p.974-985, set. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162010000500019&script=sci_arttext>. Acesso em: 23 jan. 2013.
- CUNHA, A.R.; ESCOBEDO, J.F.; KLOSOWSKI, E.S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesq. Agropec. Bras**, Brasília, v. 37, n. 6, p.735-743, jun. 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v37n6/10549.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2013.

- DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.28, n.3, p.516-524, jul/set. 2008.
- DALRI, A.B.; CRUZ, R.L.; GARCIA, C.J.B.; DUENHAS, L.H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p.1-11, jan./mar. 2008. Disponível em: <<http://200.145.140.50/ojs1/include/getdoc.php?id=752&article=277&mode=pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2013.
- DAMIÃO, J.O.; HERNANDEZ, F.B.T.; SANTOS, G.O.; ZOCOLER, J.L. Balanço hídrico da região de ilha solteira, noroeste paulista. **In**: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Uberaba, 2010. Disponível em: http://www.agr.feis.unesp.br/pdf/conird2010_damiao.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2013.
- ESTEVES, B.S.; SOUZA, E.F.; MENDONÇA, J.C.; LOUSADA, L.L.; MUNIZ, R.A.; SILVA, R.M. Variações do albedo, NDVI e SAVI durante um ciclo da cana-de-açúcar no Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias: AGRÁRIA**, Recife, v. 7, n. 4, p.663-670, out/dez 2012. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/1190/119024993020.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2013.
- FRANCO, R.A.M.; HERNANDEZ, F.B.T; TEIXEIRA, A.H.C; FEITOSA, D.G. Avaliação do balanço de energia em diferentes tipos de uso e cobertura da terra na região noroeste do Estado de São Paulo. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 16., 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 6909-6916.
- FRANCO, R.A.M.; HERNANDEZ, F.B.T.; LIMA, R.C. Análise da fragilidade ambiental na microbacia do córrego do Coqueiro, no noroeste paulista. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 16., 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 5040 - 5046. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1356.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2013.
- FRANCO, R.A.M.; HERNANDEZ, F.B.T.; MORAES, J.F.L. O uso da análise multicritério para a definição de áreas prioritárias a restauração de Área de Preservação Permanente (APP), no noroeste paulista. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 16., 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 3366 - 3373. Disponível em: <<http://http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0913.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2013.
- FRANCO, R.A.M.; HERNANDEZ, F.B.T. Qualidade da água para irrigação na microbacia do Coqueiro, Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande: v.13, n.6, p.772-780, 2009.
- FREITAS-LIMA, E.A.C.; SILVA, H.R.; ALTIMARE, A.L. Uso atual da terra no município de Ilha Solteira, SP, Brasil: riscos ambientais associados. **Holos Environment**, v.4, p.81-96, 2004.

- GIONGO, P.R.; MOURA, G.B.A.; SILVA, B.B.; ROCHA, H.R.R.; MEDEIROS, S.R.R.; NAZARENO, A.C. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p.279-287, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n3/v14n03a07.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2013.
- GRAVETTER, F. J.; WALLNAU, L. B. **Statistics for the behavioral sciences**. 2.ed. St. Paul: West Publishing, 1995. 429p.
- HENRIQUE, F.A.N.; DANTAS, R.T. Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande, Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.6, p. 594–599, 2007. <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n6/v11n06a07.pdf>>. 15 Mar. 2013.
- HERNANDEZ, F.B.T.; FRANCO, R.A.M. Avaliação da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio São José dos Dourados, no noroeste paulista. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 16., 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 5599 - 5605. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1553.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2013.
- HERNANDEZ, F.B.T.; NEALE, C.; TAGHVAEIAN, S. TEIXEIRA, A.H.C. Avaliação preliminar do modelo SEBAL para a estimativa da distribuição espacial da evapotranspiração em áreas irrigadas no noroeste paulista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15, 2011, Curitiba. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. Curitiba: Inpe, 2011. p.5209 - 5216.
- HERNANDEZ, F.B.T.; TEIXEIRA, A.H.C; NEALE, C.M.U.; TAGHVAEIAN, S. Determining actual evapotranspiration on the large scale using agrometeorological and remote sensing data in the Northwest of the São Paulo State, Brazil. In: International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, 7º, Geisenheim - Alemanha, Proceedings, 16 e 20 de julho de 2012, p.51.
- HERNANDEZ, F.B.T.; SOUZA, S.A.V.; ZOCOLER, J.L.; FRIZZONE, J.A. Simulação e efeito de veranicos em culturas desenvolvidas na região de Palmeira d'Oeste, Estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.1, p.21-30, 2003.
- HERNANDEZ, F.B.T.; LEMOS FILHO, M.A.F.; BUZETTI, S. **Software HIDRISA e o balanço hídrico de Ilha Solteira**. Ilha Solteira: UNESP. 1995. 45p. (Série Irrigação,1).
- JOHANN, J.A.; ARAÚJO, G.K.D.; ROCHA, J.V. Avaliação do perfil temporal de NDVI decedial do sensor SPOT Vegetation em pixels “puros” e “não puros” derivados de mapa de uso da terra realizado a partir do sensor Landsat-5/TM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 14, 2009, Natal. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. Natal: Inpe, 2009. p.223-229. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.13.53/doc/223-229.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2014.
- JORNAL CANA. Pioneiros Bioenergia reforça estratégia do grupo de ganhar fôlego para competir no exterior. 2009. Disponível em:

<<http://www.jornalcana.com.br/noticia/Jornal-Cana/37696+Pioneiros-Bioenergia-reforca-estrategia-do-grupo-de-ganhar-folego-para-competir-no-externo>>. Acesso em: 15 dez. 2013.

JORNAL DIÁRIO DE FATO. Unialco inaugura Usina Vale do Paraná em Suzanápolis. 2008. Disponível em: <<http://www.diariodefato.com.br/display.php?codigo=3711>>. Acesso em: 15 dez. 2013.

KRIEGER, E.I.F. **Avaliação do consumo de água, racionalização do uso e reúso do efluente líquido de um frigorífico de suínos na busca da sustentabilidade socioambiental da empresa.** 2007. 130 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12050/000618507.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 25 jul. 2010.

LIMA, G.C.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; SILVA, M.A.; OLIVEIRA, A.H.; AVANZI, J.C.; UMMUS, M.E. Avaliação da cobertura vegetal pelo índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 2, p. 204-214, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ambiagua/v8n2/20.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2014.

LOPES, D.E. Conflitos Agrários e a Agroindústria Canavieira em Castilho-Sp. **Campo-território: revista de geografia agrária**, Francisco Beltrão, v. 3, n. 5, p.93-112, 2008. Disponível em: <<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=0CHcQFjAH&url=http://www.seer.ufu.br/index.php/campoterritorio/article/download/11841/6930&ei=sLCUoi9IcH62gW7vIH0Ag&usg=AFQjCNH7r8TNpYaDfxnNyrwxAwefVQiXA A&sig2=sc2nmobVDqfVzzOJHontfg&bvm=bv.58187178,d.b2I&cad=rja>>. Acesso em: 31 dez. 2013.

LUCAS, A.A.; SCHULER, C.A.B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p.607-614, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n6/v11n06a09.pdf>>. Acesso em: 07 dez. 2013.

MEGDA, M. M. et al. Uso da água na Bacia Hidrográfica do São José dos Dourados. **In: CONIRD 2006 - XVI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem.** Goiânia - GO. 2006.

MENDONÇA, J.C. SOUSA, E.F.; BERNARDO, S.; DIAS, G.P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região norte fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003. <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v7n2/v7n2a15.pdf>>. 25 Fev. 2013.

MENDONÇA, J.C. **Estimação da evapotranspiração regional utilizando imagens digitais orbitais na região norte fluminense, RJ.** 2007. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Produção Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2007. Disponível em:

<http://www.uenf.br/Uenf/Downloads/PRODVEGETAL_3434_1189463452.pdf>.
Acesso em: 14 jan. 2014.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: Unb, 2012. 266 p. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 07 dez. 2012.

MESQUITA, F.L.L. **Monitoramento do balanço de radiação na região metropolitana do rio de janeiro**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia, Departamento de Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.meteorologia.ufrj.br/pos/dissertacoes-etes/Mesquita-Mestrado-PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ-2012.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2012.

MORAES, W.B.; JESUS JUNIOR, W.C.; MORAES, W.B.; CECÍLIO, R.A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadina, v. 5, n. 2, p.1-14, 2011. 3/342. Disponível em: <<http://www.periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/ccaatropica/article/viewFile/273/342>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações**. 4. ed. Viçosa: Ufv, 2011. 422 p.

NETO, J.D.; FIGUEREDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, H.M.; AZEVEDO, C.A.V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p.283-288, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v10n2/v10n2a06.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2013.

OLERIANO, E.S.; DIAS, H.C.T. A dinâmica da água em microbacias hidrográficas reflorestadas com eucalipto. **In: I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: O Eucalipto E O Ciclo Hidrológico**, 2007, Taubaté. Brasil: Ipabhi, 2007. p. 215 - 222. Disponível em: <www.agro.unitau.br/serhidro/doc/pdfs/215-222.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2009.

ONU. Assessment of Freshwater Resources. **Earth Summit+5**, New York, p.23-27, jun. 1997. Disponível em: <<http://www.un.org/ecosocdev/geninfo/sustdev/waterrep.htm>>. Acesso em: 25 jul. 2010.

PALLA, G.O.; SILVA, G.N.R.; SILVA, H.R.; MARQUES, A.P.; HOLANDA, H.V.; ASTOLFI, T.B.; ZOCOLER, J.V.S.; CÉZAR, F.R.G. Potencial de expansão da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) no município de Ilha Solteira/SP. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p.4218-4224. 1 DVD. ISBN: 978-85-17-00057-7

PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F.; MENDONÇA, F.C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p. 465-473, 2000. Campina Grande, PB, DEAg/UFPB.

Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662000000300025&script=sci_arttext>. Acesso em: 26 jul. 2010.

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; GALLO, P.B. radiação solar e saldo de radiação em cultivo de café a pleno sol e consorciado com banana 'prata anã'. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 3, p.485-497, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v64n3/26443.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2013.

RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat Data. **Remote Sensing**, Basel, v.2, p.1057-1076, 2010.

SÃO PAULO. INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. . **Estatísticas de Produção da Agropecuária Paulista**. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1>. Acesso em: 10 nov. 2013.

SÃO PAULO (Estado). **Plano estadual de recursos hídricos: 2004/2007** Resumo. São Paulo: DAEE, 2006. 96p.

SANTOS, G.O.; HERNANDEZ, F.B.T. Uso do solo e monitoramento dos recursos hídricos no córrego do Ipê, Ilha Solteira, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.1, p.60-68, 2013.

SANTOS, G.O.; HERNANDEZ, F.B.T.; ROSSETTI, J.C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, p.142-149, 2010.

SILVA, A.M.; HERPIN, U.; MARTINELLI, L.A. Morphometric characteristics of seven meso-scale river basins in State of São Paulo (Southeastern Brazil). **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 3, n. 17, p.20-30, fev. 2006.

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

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; SOUZA, L.S.B.; BRANDÃO, E.O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p.139-147, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v15n2/v15n2a05.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

SMITH, M. **Report on the expert consultations on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45 p. <<http://www.fao.org/nr/water/docs/Revised-FAO-Methodology-CropWaterRequirements.pdf>>. 25 Set. 2012.

Teixeira, A. H. de C. ; Hernandez, F. B. T. ; LOPES, H. L. ; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. A Comparative Study of Techniques for Modeling the Spatiotemporal Distribution of Heat and Moisture Fluxes in Different Agroecosystems in Brazil. In: PETROPOULOS, G.P. (Editor): "**Remote Sensing of**

Energy Fluxes and Soil Moisture Content". 1ed. Boca Raton, Florida: CRC Group, Taylor and Francis, 2013, v., p. 165-187.

TEIXEIRA, A.H.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; LOPES, H.L. Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of land use changes in the semi-arid region of Brazil. **In:** SPIE Remote Sensing Symposium, 2012, Edimburgo. Proceedings of Spie, v. 8531, p.85310P-1-85310P-9., 2012.

TEIXEIRA, A.H.C.; SHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F.B.T.; LOPES, H.L. Water productivity assessment by using MODIS images and agrometeorological data in the Petrolina municipality, Brazil **In:** SPIE Remote Sensing Symposium, 2012, Edimburgo. Proceedings of Spie, v. 8531, p.85310G-1-85310G-10. 2012.

TEIXEIRA, A.H.C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing an Penman-Monteith equation. **Rem. Sens.**, v.2, p.1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D., BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation," **Agric. For. Meteorol.**, 149, 477-490, 2009.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D.; BOS, M.G. Analysis of energy fluxes and vegetationatmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **J. Hydrol.**, Philadelphia, v.362, p.110-127, 2008.a

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; MOURA, M.S.B.; SOARES, J.M.; AHMAD, M.D.; BOS, M.G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural And Forest Meteorology**, Philadelphia, v.148, p.1524-1537, 2008.b

UNESP. Canal Clima da Unesp Ilha Solteira - Área de Hidráulica e Irrigação. Disponível em: <<http://clima.feis.unesp.br/>>. Acesso em: 2 mar. 2013.

USINA SANTA ADÉLIA. Nossa História. 2013. Disponível em: <<http://site.usinasantaadelia.com.br/nossa-historia.html>>. Acesso em: 15 dez. 2013.

VANZELA, L.S. **Planejamento integrado dos recursos hídricos na microbacia do córrego Três Barras no município de Marinópolis - SP.**2008. 213 f. Tese (Doutorado) - Curso de Sistemas de Produção, Departamento de Fitossanidade Engenharia Rural e Solos - Defers, Faculdade de Engenharia - Unesp - Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2008. Disponível em: <http://www.agr.feis.unesp.br/pdf/lsv_tese.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2014.

VON RANDOW, R.C.S.; ALVALÁ, R.C.S. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica no pantanal sul mato-grossense durante os períodos secos de 1999 e 2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p.498-412, dez. 2006.