

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Paula Sulzbach Rilho

**IDENTIFICAÇÃO DE TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR  
SENSORIAMENTO REMOTO EM DIFERENTES CULTIVOS AGRÍCOLAS NO  
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Porto Alegre

2018

Paula Sulzbach Rilho

**IDENTIFICAÇÃO DE TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR  
SENSORIAMENTO REMOTO EM DIFERENTES CULTIVOS AGRÍCOLAS NO  
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Anderson Ruhoff

Coorientadora: Elisa Kich

Porto Alegre

2018

## CIP - Catalogação na Publicação

Rilho, Paula Sulzbach

Identificação de taxas de evapotranspiração por sensoriamento remoto em diferentes cultivos agrícolas no estado do Rio Grande do Sul / Paula Sulzbach Rilho. -- 2018.

64 f.

Orientador: Anderson Ruhoff.

Coorientadora: Elisa Kich.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Evapotranspiração. 2. Agricultura. 3. Sensoriamento remoto. 4. SEBAL. I. Ruhoff, Anderson, orient. II. Kich, Elisa, coorient. III. Título.

Paula Sulzbach Rilho

**IDENTIFICAÇÃO DE TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR  
SENSORIAMENTO REMOTO EM DIFERENTES CULTIVOS AGRÍCOLAS NO  
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

**Prof. Anderson Ruhoff**  
Orientador

**Elisa Kich**  
Coorientadora

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 07/12/2018 pela banca examinadora constituída por:

**Alfonso Risso**

**Ayan Santos Fleischmann**

**Rafael Henrique Bloedow Kayser**

## RESUMO

Esse trabalho de conclusão de curso buscou determinar, por meio de imagens de sensoriamento remoto e aplicação de um algoritmo de balanço de energia (SEBAL), as taxas de evapotranspiração (ET) em três diferentes condições de cobertura do solo no estado do Rio Grande do Sul: área de cultivo de arroz irrigado, área de cultivo de soja e área em condições de vegetação natural do bioma Pampa. Para cada área estudada, foram analisadas 7 imagens do satélite LANDSAT e foram obtidos, a partir da aplicação do algoritmo, resultados de radiação líquida em superfície, fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e ET diária. Esses resultados foram validados com dados observados em torres micrometeorológicas pelo método de covariância de vórtices turbulentos. Entre as três áreas estudadas, a área de cultivo de arroz apresentou os resultados com maior acurácia para ET diária e, em relação aos componentes do balanço energético, o saldo de radiação apresentou as estimativas mais acuradas. O monitoramento da variabilidade temporal das taxas de ET apresentou limitações devido à necessidade de obtenção de imagens de satélite livres de nuvens e à baixa resolução temporal do LANDSAT. No verão, foram observadas as taxas mais elevadas de ET, devido às condições climáticas observadas no Estado e as fases de desenvolvimento dos cultivos agrícolas. Para a área de cultivo de arroz irrigado, as taxas de ET calculadas pelo SEBAL variaram entre 2,3 mm/dia (durante períodos de solo exposto sem cultivo agrícola) e 7,6 mm/dia (durante períodos de agricultura irrigada). Em áreas de cultivo de soja não irrigada, a menor taxa de ET calculada foi de 1,5 mm/dia (durante os meses de inverno, no qual o solo encontra-se sem a cultura agrícola), enquanto a maior taxa de ET foi de 6,2 mm/dia (durante os meses de verão, com pleno desenvolvimento da cultura). As áreas cobertas com gramíneas do bioma Pampa apresentaram taxas de ET variando entre 1,0 e 6,1 mm/dia. O elevado consumo de água obtido para o cultivo de arroz justifica a grande demanda de água pelo setor da agricultura. As áreas de vegetação natural e de cultivo não irrigado também apresentaram elevadas taxas de ET e, ainda que não representem um uso de água pelo setor, apresentam relevância para o balanço hídrico da região. A identificação das taxas de ET nas diferentes condições de uso e cobertura do solo se mostra muito importante para a gestão de recursos hídricos.

**Palavras-chave:** *Evapotranspiração, agricultura, sensoriamento remoto, SEBAL.*

## ABSTRACT

This study aims to determine, through remote sensing images and the application of an energy balance algorithm (SEBAL), evapotranspiration rates in three different soil cover conditions in the state of Rio Grande do Sul: irrigated rice cropland, soybean cropland and natural vegetation conditions of pampa biome. For each studied area, 7 images from the LANDSAT satellite were analyzed and, from the application of the algorithm, results of net radiation, sensible heat flux, latent heat flux and daily evapotranspiration were obtained. These results were validated with data observed in micrometeorological towers using the Eddy Covariance method. Among the three studied areas, the irrigated rice cropland area presented the best results for daily evapotranspiration and, about the analyzed components of the energy balance, the net radiation presented high accuracy. The monitoring of the temporal variability of ET rates presented limitations due to the need to obtain cloud-free satellite images and the low temporal resolution of LANDSAT. The highest ET rates were observed in summer, due to the climatic conditions observed in the State and the development stages of agricultural crops. For irrigated rice cropland, the evapotranspiration rates calculated by SEBAL ranged from 2.3 mm/day (during periods of exposed soil without agricultural cultivation) to 7.6 mm/day (during periods of irrigated agriculture). In the non-irrigated soybean cropland area, the lowest ET rate calculated was 1.5 mm/day (during the winters), while the highest was 6.2 mm/day (during the summer months). The areas covered with grasses of the Pampa biome showed ET rates varying between 1.0 and 6.1 mm / day. The high water consumption obtained for rice cultivation justifies the great demand of water by the agriculture sector. The areas of natural vegetation and non irrigated cultivation also presented high ET rates and, although they do not represent a use of water by the sector, they have relevance for the water balance of the region. The identification of ET rates in different soil use and cover conditions is very important for the management of water resources.

**Keywords:** *Evapotranspiration, agriculture, remote sensing, SEBAL.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de soja nos estados brasileiros, em toneladas. ....	14
Figura 2 – Produção de arroz nos estados brasileiros, em toneladas. ....	14
Figura 3 - Calendário agrícola de plantio (verde) e de colheita (laranja) do arroz e da soja na região sul do Brasil. (Fonte: adaptado de CONAB, 2018) .....	15
Figura 4 - Sazonalidade do uso de água para o arroz inundado. (Fonte: ANA, 2017b). .....	16
Figura 5 - Balanço energético na superfície. (Fonte: adaptado de NASA, 2010). ....	21
Figura 6 - Esquema da metodologia do trabalho. ....	27
Figura 7 – Área de estudo de cultivo de arroz irrigado. ....	29
Figura 8 - Área de estudo de cultivo de soja. ....	30
Figura 9 – Área de estudo de campo. ....	31
Figura 10 - Torre micrometeorológica de Cachoeira do Sul (CAC) e área de cultivo de arroz do entorno. (Fonte: Rede Sulflux). ....	35
Figura 11 - Torre micrometeorológica de Cruz Alta (CRZ) e área de cultivo de soja do entorno. (Fonte: Rede Sulflux). ....	36
Figura 12 - Torre micrometeorológica de Santa Maria (SMA) (Fonte: Rede Sulflux). ....	37
Figura 13 – Dispersão dos valores calculados em comparação aos valores observados para a radiação líquida. ....	41
Figura 14 – Dispersão dos valores calculados em comparação aos valores observados para o fluxo de calor sensível. ....	43
Figura 15 – Dispersão dos valores calculados em comparação aos valores observados para o fluxo de calor latente. ....	45
Figura 16 - Dispersão dos valores calculados em comparação aos valores observados para a ET diária. ....	48
Figura 17 - ET diária das imagens estudadas. ....	50
Figura 21 - Variabilidade espacial da ET diária, na área de estudo de cultivo de arroz irrigado, para o dia 28/01/2014. ....	52
Figura 22 - Variabilidade espacial da ET diária, na área de estudo de cultivo de soja, para o dia 19/01/2014. ....	53
Figura 23 - Variabilidade espacial da ET diária, na área de estudo de campo, para o dia 19/01/2014. ....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo de informações sobre os principais sistemas sensores com imageamento termal.....	19
Tabela 2 - Informações das bandas dos satélites LANDSAT 5 e 8.....	26
Tabela 3 - Imagens LANDSAT selecionadas para a área de estudo de cultivo de arroz irrigado. ....	32
Tabela 4 - Imagens LANDSAT selecionadas para a área de estudo de cultivo de soja. ....	32
Tabela 5 - Imagens LANDSAT selecionadas para a área de estudo de campo.....	33
Tabela 6 - Resumo das características das torres micrometeorológicas utilizadas. .	37
Tabela 7 – Diferenças entre os valores calculados e observados de saldo de radiação líquida ( $R_n$ ) instantâneo. ....	39
Tabela 8 – Diferenças entre os valores calculados e observados de fluxo de calor sensível ( $H$ ) instantâneo.....	41
Tabela 9 – Diferenças entre os valores calculados e observados de fluxo de calor latente ( $LE$ ) instantâneo. ....	43
Tabela 10 – RMSE, em $W/m^2$ e %, obtidos nas três áreas de estudo.....	45
Tabela 11 – Diferenças entre os valores calculados e observados de evapotranspiração diária. ....	47
Tabela 12 - RMSE, em mm e %, obtidos nas três áreas de estudo. ....	48
Tabela 13 - Dados de entrada da área de estudo de cultivo de soja, para cálculo no SEBAL.....	62
Tabela 14 - Dados de entrada da área de estudo de cultivo de arroz irrigado, para cálculo no SEBAL.....	62
Tabela 15 - Dados de entrada da área de estudo de campo, para cálculo no SEBAL. ....	63

## LISTA DE ACRÔNIMOS

CAC	Torre micrometeorológica de Cachoeira do Sul
CRZ	Torre micrometeorológica de Cruz Alta
ET	Evapotranspiração
ETM+	Sensor <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
FE	Fração evaporativa
G	Fluxo de calor no solo
H	Fluxo de calor sensível
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LE	Fluxo de calor latente
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OLI	Sensor <i>Operational Land Imager</i>
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
$R_n$	Radiação líquida que incide na superfície
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SMA	Torre micrometeorológica de Santa Maria
TIRS	Sensor <i>Thermal Infrared</i>
TM	Sensor <i>Thematic Mapper</i>
VAB	Valor Bruto da Produção Agropecuária

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
2. OBJETIVO .....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1. Panorama das culturas agrícolas no Brasil e no RS.....	14
3.2. Medições <i>in situ</i> de evapotranspiração.....	17
3.3. Monitoramento de evapotranspiração por sensoriamento remoto.....	18
3.3.1. O algoritmo SEBAL .....	20
3.3.2. LANDSAT .....	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	27
4.1. Áreas de estudo.....	28
4.2. Imagens LANDSAT .....	31
4.3. SEBAL .....	33
4.4. Torres micrometeorológicas .....	34
5. RESULTADOS .....	39
5.1. Validação do balanço energético.....	39
5.2. Evapotranspiração diária .....	46
5.2.1. Validação.....	46
5.2.2. Variabilidade temporal.....	49
5.2.3. Variabilidade espacial.....	51
5.3. Discussão .....	54
6. CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS.....	58
APÊNDICE A - DADOS DE ENTRADA SEBAL.....	62

## 1. INTRODUÇÃO

A agricultura desempenha importante papel na vida das pessoas, desde as civilizações antigas, quando foi a principal responsável pelo surgimento dos primeiros aglomerados, até os dias atuais, em que fornece alimentos para a população e movimentada a economia mundial. O desenvolvimento da agricultura apresentou tendência em ocorrer, primeiramente, nas regiões com características físicas e climáticas favoráveis, em que a necessidade hídrica das plantas é suprida pela quantidade e distribuição de chuvas da região.

A prática da irrigação, que envolve equipamentos e técnicas que visam suprir a deficiência total ou parcial de água, permitiu o crescimento da agricultura em regiões de escassez hídrica. No Brasil, a prática de irrigação teve início no Estado do Rio Grande do Sul, na década de 1900, com o plantio de arroz irrigado, e vem se intensificando desde as décadas de 1970 e 1980 (ANA, 2017a). O crescimento da prática de irrigação traz os benefícios de aumento de produtividade e atenuação de riscos climáticos/meteorológicos, mas resulta em um aumento no uso de água pelo setor (ANA, 2017a).

A agricultura é o setor responsável pela maior demanda de água no mundo, com uma porcentagem de 70% da água total retirada, comparados a 19% do setor industrial e 11% do setor de serviços (FAO, 2016). A demanda de água para a agricultura varia de acordo com a economia e as condições climáticas dos países, variando de mais de 80% na África e na Ásia a aproximadamente 20% na Europa (FAO, 2016).

No Brasil, a demanda de água anual retirada para a irrigação é de 969 m<sup>3</sup>/s, valor que corresponde a 46,2% do total de retirada de água no país (ANA, 2017b). Quando se considera o consumo, que se refere a água retirada que não retorna diretamente aos corpos hídricos, o uso de água na irrigação é ainda mais relevante, devido ao seu retorno muito pequeno quando comparado aos demais usos (ANA, 2017b). De um total de água consumida de 1.109m<sup>3</sup>/s no Brasil anualmente, 67,2% equivalem ao consumo pela irrigação (ANA, 2017b).

A ANA (2017a) analisou o potencial de expansão da agricultura irrigada no Brasil, prevendo um crescimento de 11.198 mil hectares em áreas irrigadas entre 2017 e 2030, o que representa um aumento na retirada de água pelo setor de 969 para 1.337,9 m<sup>3</sup>/s. O Rio Grande do Sul, pioneiro entre os estados brasileiros na aplicação

de práticas de irrigação, ainda é o responsável pela maior área irrigada do país, equivalente a 19,5% da área nacional (ANA, 2017a). Para o horizonte previsto de 2030, estima-se que a área irrigada no estado terá um incremento de 1.183 mil hectares.

O consumo de água na agricultura ocorre, predominantemente, por meio da evapotranspiração (ET), que, segundo Allen et al. (1998), é a combinação de dois processos pelos quais a água é perdida para a atmosfera: a evaporação, que ocorre quando a água líquida das superfícies é convertida em vapor, e a transpiração, que consiste na vaporização da água líquida contida nos tecidos das plantas.

Há diferentes metodologias, já desenvolvidas e ainda em estudo, para medir e estimar a ET, mas este continua sendo o componente do ciclo hidrológico com maior dificuldade em ser estimado, devido a sua heterogeneidade espacial e temporal. A variabilidade da ET ocorre devido à dependência deste processo com diversos fatores, como condições climáticas, características da vegetação, entre outros aspectos ambientais (ALLEN et al., 1998).

A ET pode ser medida diretamente em campo com o uso de diferentes instrumentos, como lisímetros, cintilômetros e analisadores de gás através do método de covariância de vórtices turbulentos (SWIBANK, 1951; OBUKHOV, 1951). Os métodos de medição em campo desenvolvidos apresentam escala espacial de medição variada, mas ainda apresentam limitação para aplicação em grandes áreas, sobretudo em áreas de agricultura (BIGGS et al., 2015). No Brasil, a rede de monitoramento *in situ* de ET é bastante limitada e dados relativos a ET são escassos.

O uso de imagens multiespectrais e termais de sensores remotos surge como uma alternativa cada vez mais empregada, em diferentes campos de aplicação, para identificação de taxas de ET. Conforme Biggs et al. (2015), o uso do sensoriamento remoto permite o monitoramento da variabilidade espaço-temporal das taxas de ET em diferentes culturas agrícolas e condições de cobertura da terra.

No atual cenário brasileiro, tendo em vista a expansão prevista no país da agricultura irrigada, e conseqüente aumento na demanda de água do setor, associado a necessidade de assegurar os usos múltiplos da água, prevista na Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL,1997), o monitoramento da ET em grande escala, proporcionada por ferramentas de sensoriamento remoto, apresenta oportunidade de grande avanço. Devido a sua relevância no balanço hídrico, por ser o processo responsável pelo transporte de grandes volumes de água da superfície para a

atmosfera, o estudo da ET auxilia na gestão e na alocação de recursos hídricos, sobretudo em regiões de escassez (ANDERSON, 2012), auxiliando no cálculo de disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas. Na agricultura, a estimativa da quantidade de água evaporada e transpirada por diferentes tipos de cultivo é útil para monitoramento do uso da água, fiscalização de outorgas e busca por sistemas de produção mais eficientes (ALLEN; MORSE; TASUMI, 2003).

Nos últimos anos, já se pode observar um aumento da produtividade em cultivos agrícolas, como ocorreu com o plantio de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (ANA, 2017b). Para o cenário futuro a médio prazo, espera-se que a produção de arroz continue em crescimento no estado, mas sem incremento tão significativo da área irrigada, em função do aumento da produtividade (ANA, 2017b), que pode ser potencializado com o melhor entendimento do consumo hídrico das plantas.

Além do aumento na produtividade de cultivos já irrigados, como o arroz no Rio Grande do Sul, o entendimento do consumo hídrico das culturas, obtido por meio da estimativa da ET, auxilia na implantação de novos sistemas de irrigação. O estado, nos últimos anos, tem se destacado nacionalmente por apresentar um dos principais polos de expansão de irrigação por pivôs centrais, usados principalmente no cultivo de grãos (ANA, 2017a), como a soja.

Os sistemas sensores e os algoritmos utilizados para identificação de taxas de ET apresentam limitações (FISHER et al., 2017; BIGGS et al., 2015), que precisam ser entendidas e exploradas para que o mapeamento de ET em grandes escalas espaciais passe a ser amplamente utilizado para as finalidades apontadas. Compreendendo as deficiências e aperfeiçoando as técnicas, o monitoramento da ET por sensoriamento remoto será um grande aliado na gestão de recursos hídricos, alocação da água e aumento de produtividade em sistemas de agricultura irrigados, contribuindo para um desenvolvimento sustentável do país.

## 2. OBJETIVO

O objetivo principal do trabalho consiste em identificar, com o uso de imagens de sensores remotos, a variabilidade espacial e temporal das taxas de ET em três diferentes condições de cobertura do solo no estado do Rio Grande do Sul: em áreas de agricultura irrigada (com cultivos de arroz), em áreas de agricultura não-irrigada (com cultivos de soja), além de condições de vegetação natural do bioma Pampa.

Como objetivos específicos, busca-se:

- I. Estimar as taxas de ET de culturas agrícolas (irrigadas e não-irrigadas) no Estado do Rio Grande do Sul;
- II. Avaliar a acurácia da estimativa de ET por sensoriamento remoto, validando os resultados obtidos com dados observados em campo pelo método de covariância de vórtices turbulentos;
- III. Comparar as taxas de ET em diferentes condições de uso e cobertura da terra, sobretudo no que se refere a demanda hídrica de cultivos agrícolas em relação a condições de vegetação natural do bioma Pampa.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. PANORAMA DAS CULTURAS AGRÍCOLAS NO BRASIL E NO RS

No Brasil, o estado do Rio Grande do Sul tem grande contribuição no setor da agricultura, principalmente na produção de soja e de arroz. Segundo resultados preliminares do Censo agropecuário (IBGE, 2017), o RS é o maior produtor de arroz do país, sendo responsável por 66% da produção nacional, e o segundo maior produtor de soja, com uma contribuição de 16% do total de toneladas produzidas. A Figura 1 e a Figura 2 apresentam a produção em cada estado brasileiro na produção, em toneladas, de soja e de arroz, segundo dados levantados por IBGE (2017).

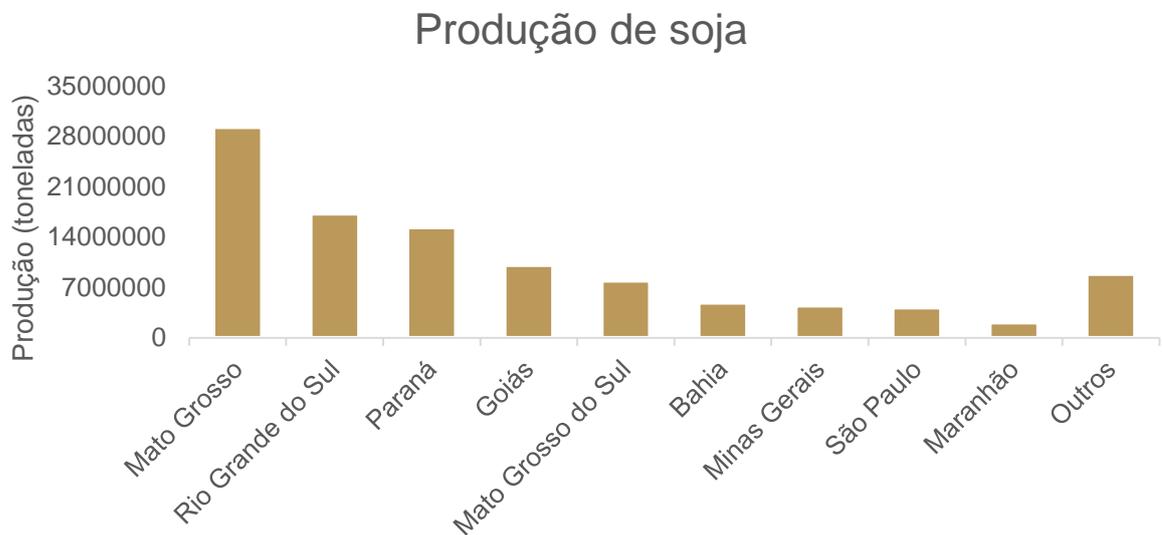


Figura 1 - Produção de soja nos estados brasileiros, em toneladas.

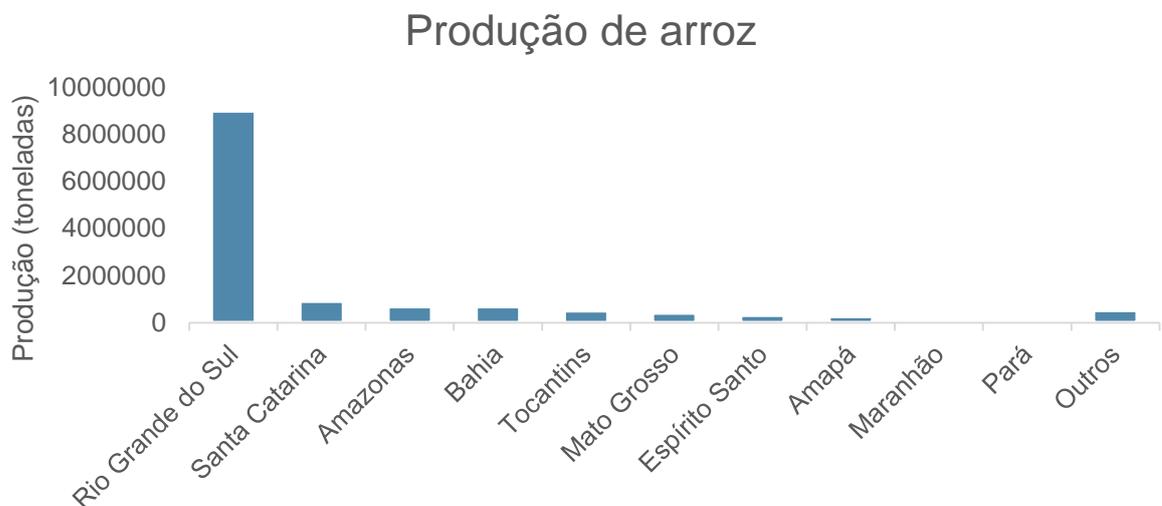


Figura 2 – Produção de arroz nos estados brasileiros, em toneladas.

A soja e o arroz são culturas de verão, como mostra o calendário dos dois cultivos agrícolas na região sul do Brasil (Figura 3). Observa-se que a época de plantio, indicada em verde na figura, se concentra nos meses do final do ano para ambos os cultivos, e a época de colheita, apontada em laranja, nos meses iniciais do ano. Durante o inverno, de junho a agosto, o solo normalmente fica exposto.

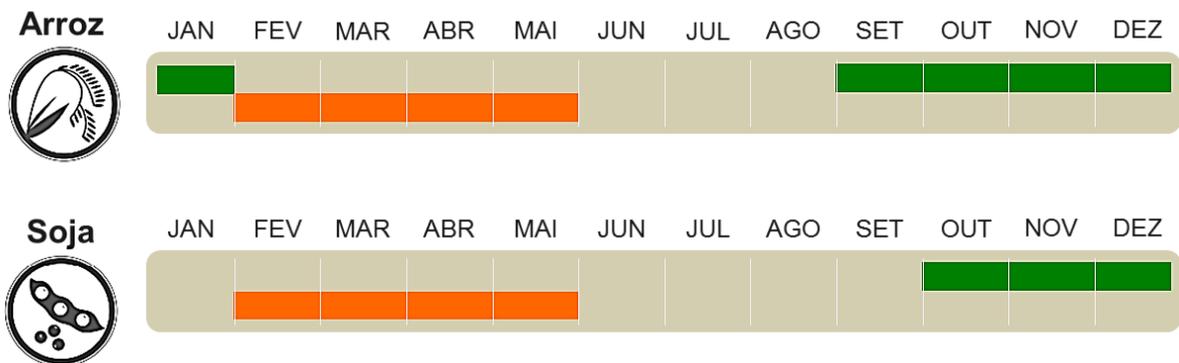


Figura 3 - Calendário agrícola de plantio (verde) e de colheita (laranja) do arroz e da soja na região sul do Brasil. (Fonte: adaptado de CONAB, 2018)

A sazonalidade no ciclo de cultivo do arroz é bastante expressiva, caracterizada pela ocorrência de uma safra por ano, que, nos principais polos produtores, concentra o plantio entre setembro/outubro e a colheita entre fevereiro/março. A sazonalidade é refletida na demanda de água da cultura, conforme mostra a Figura 4, na qual observa-se um uso de água bastante superior à média anual nos meses de dezembro a fevereiro, durante o desenvolvimento da planta, e bastante inferior entre abril e agosto.



Figura 4 - Sazonalidade do uso de água para o arroz inundado. (Fonte: ANA, 2017b).

Para os municípios do Rio Grande do Sul, Steinmetz e Braga (2001) recomendam os períodos compreendidos entre 21 de setembro a 10 de dezembro como favoráveis para a semeadura do arroz, variando de acordo com o ciclo da cultura e com a região.

Diferente de outros estados brasileiros, o plantio de arroz no estado do RS ocorre predominantemente de forma irrigada, o que minimiza – mas não elimina - a possibilidade de existir restrições climáticas, que ainda podem ocorrer devido a anomalias na temperatura e indisponibilidade hídrica na região para a irrigação (CONAB, 2018). Na safra 2017/18, a área total de arroz plantado no estado foi de 1.077,6 mil hectares, sendo 100% desta área irrigada (CONAB, 2018).

A água de fato requerida para o crescimento do arroz equivale à quantidade consumida por meio de ET. No entanto, quando o arroz é cultivado na forma irrigada, inclui-se na demanda hídrica as quantidades de água necessárias para saturação do solo e formação da lâmina de água e perdas por meio do fluxo lateral e da percolação (STONE, 2005). Para o Rio Grande do Sul, Scivittar, Petrini e Gomes (2018) estimam que a ET em lavouras de arroz irrigado varia entre 6,7 e 7,7 mm/dia, dependendo da região do estado.

A soja, assim como o arroz, é uma cultura de verão e, para o Rio Grande do Sul, apresenta uma época indicada de semeadura que se estende de 15 de outubro a 15 de dezembro (GARCIA, 2018). A colheita da soja pode ter início em

fevereiro/março e se estender até abril/maio, dependendo principalmente da variedade da planta cultivada. A soja é usualmente cultivada na forma de sequeiro, ou seja, sem irrigação, sendo, portanto, mais afetada por adversidades climáticas.

Nos últimos anos, o cultivo de soja tem aumentado, atingindo uma área plantada de 5.692,1 mil hectares na safra 2017/18, a maior área semeada que se tem registros para o estado (CONAB, 2018). Entre 2008 e 2016, a soja apresentou variação positiva de 112,9% no seu valor de produção, sendo um dos principais contribuintes para o crescimento do Valor Bruto da Produção Agropecuária (VAB), que mostra a evolução do desempenho das lavouras e da pecuária ao longo do ano e corresponde ao faturamento bruto do estado (FEIX; LEUSIN JÚNIOR; AGRANONIK, 2017).

A disponibilidade hídrica constitui-se na principal limitação climática para o crescimento da soja e na maior causa de variabilidade no rendimento dos grãos de um ano para o outro, sobretudo na região sul do Brasil (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). A demanda hídrica no cultivo da soja depende do estágio de desenvolvimento da planta, atingindo o máximo de 7 a 8 mm/dia durante a floração de grãos, e decrescendo após este período (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Além do estágio de desenvolvimento da planta, a variedade e a densidade da vegetação, juntamente com as condições climáticas da região, influenciam diretamente na ET do cultivo agrícola (ALLEN et al., 1998).

O conhecimento das taxas de ET das diferentes plantas cultivadas, em cada estágio de desenvolvimento e no seu ciclo todo, é de grande importância para o manejo da água em áreas de agricultura irrigada, como é o caso do arroz no Rio Grande do Sul. Em cultivos não irrigados, como ocorre com a soja no estado, a estimativa da ET também é importante, pois auxilia na definição das práticas de cultivo – como, por exemplo, a época de semeadura - a serem adotadas, de acordo com a disponibilidade hídrica da região (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

### 3.2. MEDIÇÕES *IN SITU* DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A ET pode ser medida em campo com o uso de diferentes tipos de instrumentos, dentre os quais inclui-se o método de covariância dos vórtices turbulentos.

Covariância dos vórtices turbulentos - ou, do inglês, *Eddy Covariance* – é um método de micrometeorologia bastante usado na medição de fluxos turbulentos de

calor sensível e calor latente. O método, proposto por Montgomery (1948), Swinbank (1951) e Obukhov (1951), mede de forma direta as trocas de gases, de energia e de momento entre a superfície e a atmosfera (AUBINET; VESALA; PAPALE, 2012).

As torres com sistemas de medição por vórtices turbulentos consistem, geralmente, de um anemômetro sônico tridimensional, que mede a velocidade e a direção do vento, e um analisador de gás, que mede flutuações na concentração de gases presentes na atmosfera, como o gás carbônico ou o vapor d'água.

A definição da localização e do design da torre micrometeorológica devem envolver a análise de requisitos científicos, padrões de engenharia, custo e praticidade (AUBINET; VESALA; PAPALE, 2012). Áreas de agricultura apresentam, normalmente, uma composição mais homogênea, em comparação a áreas de floresta e de campo, o que pode minimizar potenciais problemas na medição (AUBINET; VESALA; PAPALE, 2012).

O método de medição de covariância dos vórtices turbulentos apresenta um problema de desbalanceamento energético: a soma dos fluxos de calor latente e de calor sensível são normalmente inferiores à energia disponível, representado pelo saldo de radiação menos o fluxo de calor no solo (LIU; XU, 2017).

Segundo Twine et al. (2000), existem técnicas de processamento dos dados medidos para forçar o fechamento do balanço energético, que incluem: (1) calcular o fluxo de calor latente como residual do balanço energético da superfície; e (2) ajustar ambos os fluxos, de calor latente e de calor sensível, utilizando o método de correção da razão de Bowen.

A medição *in situ* apresenta limitações para estimativa de ET em grandes áreas, principalmente em áreas de agricultura, devido à grande variabilidade espacial da ET. A variabilidade espacial da ET deve-se à variação da precipitação, às características hidráulicas do solo e ao tipo e densidade da vegetação (ALLEN et al., 2002). Medidas de campo são normalmente utilizadas para calibração e validação de resultados obtidos por sensoriamento remoto ou a partir de modelos.

### 3.3. MONITORAMENTO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO

A principal vantagem do uso de dados adquiridos por sensoriamento remoto é, conforme apontam Melesse et al. (2008), a capacidade de gerar informações em grandes escalas de espaço e tempo. As medições do espectro eletromagnético feitas

por sensoriamento remoto são usadas na caracterização da paisagem e determinação de suas propriedades, como o albedo, a temperatura de superfície, os índices de vegetação (MELESSE et al., 2008).

Liou e Kar (2014) apontam como limitação do uso do sensoriamento remoto a indisponibilidade, em um sensor satélite, de altas resoluções temporais e espaciais simultaneamente. Conforme os autores, satélites com alta resolução espacial normalmente apresentam baixa frequência temporal, e vice-versa.

Conforme levantado por Fisher et al. (2017), nenhuma missão espacial atende plenamente os requisitos espaciais, temporais, espectrais e de acurácia para aplicação do sensoriamento remoto na estimativa da ET e avanços ainda são necessários para que o mapeamento da ET por sensoriamento remoto seja amplamente utilizado nos diferentes campos de aplicação. Objetivos futuros levantados pelos autores incluem obter erros relativos inferiores a 10%, resolução espacial de 10 a 100 m e temporal em escalas diárias ou sub-diárias, além de monitoramento a longo prazo e em escalas globais de cobertura (FISHER et al., 2017).

Kich (2018) levantou os possíveis sensores que podem ser usados na estimativa de ET, que são aqueles que possuem uma de suas bandas na faixa do infravermelho termal. Na Tabela 1, são listados estes sensores, com suas respectivas informações de período de revisita, resoluções espaciais das bandas multiespectrais e da banda termal, e o período de disponibilidade de dados

Tabela 1 - Resumo de informações sobre os principais sistemas sensores com imageamento termal.

<b>Sistema sensor</b>	<b>Período de revisita</b>	<b>Resolução espacial (m)</b>	<b>Resolução da banda termal (m)</b>	<b>Dados disponíveis desde</b>
ASTER	16 dias	15	90	1999
AVHRR	0,5 dia	1100	1100	1978
GOES	15 min	4000	4000	1966
MODIS	0,5 dia	250	1000	1999/2002
Sentinel – 3 SLSTR	27 dias	500	1000	2016
LANDSAT OLI/TIRS	16 dias	30	100	2013
LANDSAT TM	16 dias	30	120	1972
LANDSAT ETM	16 dias	30	60	1999

Fonte: Kich, 2018.

Os sensores presentes nos satélites não medem a ET de forma direta, logo faz-se necessário o uso de algoritmos que calculam a ET através de estimativas de radiância da superfície (BIGGS et al, 2015). Os algoritmos desenvolvidos podem ser classificados em três grandes grupos, de acordo com a forma como são resolvidos:

(1) métodos baseados na vegetação; (2) métodos baseados na temperatura de superfície; e (3) métodos empíricos e estatísticos (do triângulo).

Conforme Li et al. (2009), nenhum modelo desenvolvido pode ser aplicado globalmente, sem que haja significativa perda na resolução espacial, devido às grandes diferenças observadas no terreno e no clima. Cada modelo apresenta vantagens e desvantagens e, para aplicação em uma área de estudo, devem ser feitas adaptações para obtenção de melhores resultados de ET obtidos por sensoriamento remoto.

### 3.3.1. O algoritmo SEBAL

O algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) foi desenvolvido por Bastiaanssen et al. (1998), com o objetivo de monitorar a ET regional com o uso de sensoriamento remoto, utilizando o mínimo de dados meteorológicos observados em campo. O SEBAL é um método baseado na temperatura de superfície, que frequentemente é chamado de método de balanço energético.

O uso do SEBAL é bastante difundido mundialmente e já foi aplicado em diferentes condições climáticas e de cobertura do solo. Bastiaanssen et al. (2005) revisaram validações do modelo SEBAL em uma variedade de climas e ecossistemas, em diferentes países. Os autores concluíram que o algoritmo apresenta acurácia de +/- 15% na estimativa de ET em escalas diárias.

Conforme descrito por Allen et al. (2002), no modelo SEBAL, o fluxo de calor latente, que é perdido na superfície devido à ET, é calculado a partir de dados de imagens de satélite multiespectrais e dados climatológicos utilizando a Equação 1 a seguir, que representa o balanço energético da superfície, ilustrado na Figura 5.

$$LE = R_n - G - H \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

LE é o fluxo instantâneo de calor latente (W/m<sup>2</sup>);

R<sub>n</sub> é a radiação líquida na superfície (W/m<sup>2</sup>);

G é o fluxo de calor no solo (W/m<sup>2</sup>);

H é o fluxo de calor sensível (W/m<sup>2</sup>).

A obtenção de cada uma das variáveis da Equação 1 é descrita a seguir.

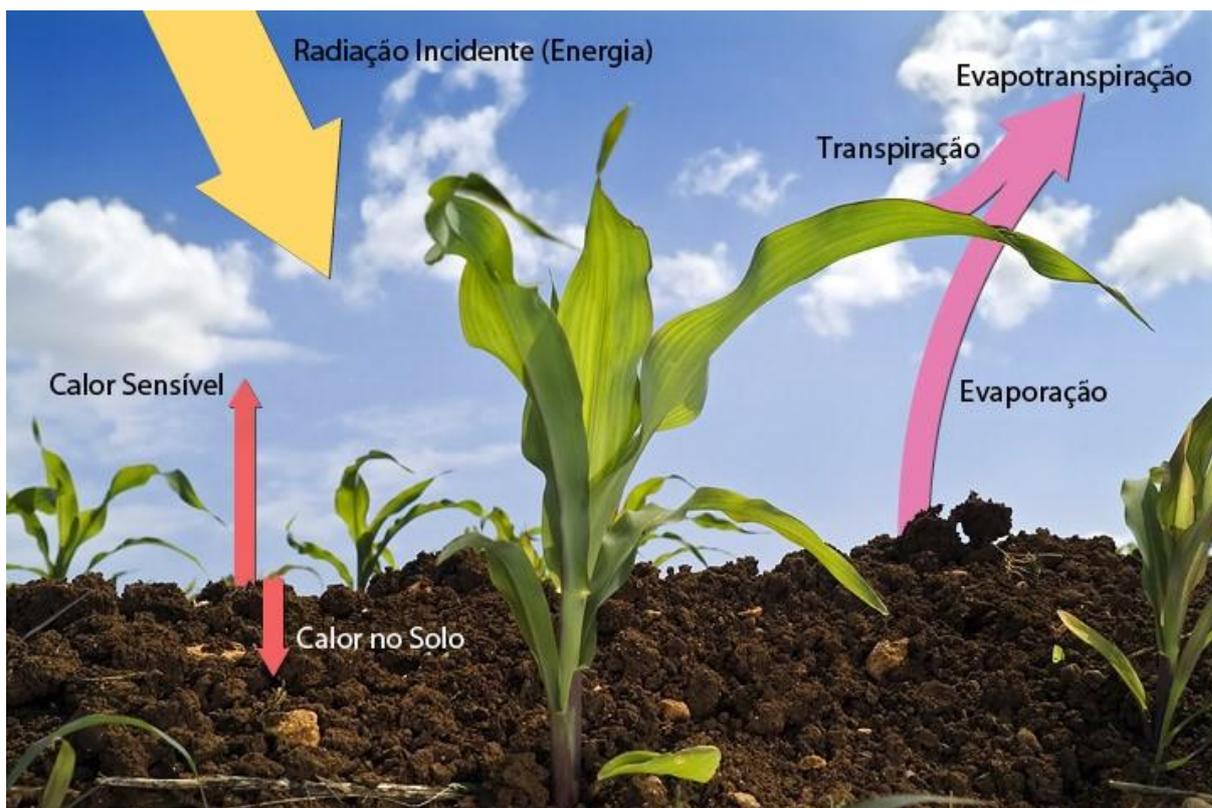


Figura 5 - Balanço energético na superfície. (Fonte: adaptado de NASA, 2010).

### 3.3.1.1. Radiação líquida

A radiação líquida na superfície pode ser calculada a partir do balanço dos fluxos de radiação incidentes subtraídos dos fluxos de radiação refletidos, conforme Equação 2, e representa a energia disponível na superfície (ALLEN et al, 2002).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$R_{S\downarrow}$  é a radiação de ondas curtas incidentes ( $W/m^2$ );

$R_{L\downarrow}$  é a radiação de ondas longas incidentes ( $W/m^2$ );

$R_{L\uparrow}$  é a radiação de ondas longas refletidas ( $W/m^2$ );

$\alpha$  é o albedo da superfície (adimensional);

$\varepsilon_0$  é a emissividade da superfície (adimensional).

O albedo da superfície é um coeficiente, definido como a fração refletida da radiação incidente de ondas curtas, calculado a partir da informação reflectância de cada banda espectral da imagem de satélite.

A emissividade, definida como a razão entre a radiância de um corpo em uma dada temperatura e a radiância de um corpo negro na mesma temperatura, é calculada, no SEBAL, em função do índice de vegetação

Para o cálculo da radiação de ondas curtas incidentes, que representa o fluxo de radiação solar que realmente atinge a superfície da Terra, utiliza-se a Equação 3 a seguir:

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} \times \cos \theta \times d_r \times \tau_{SW} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$G_{SC}$  é a constante solar (1367 W/m<sup>2</sup>);

$\theta$  é o ângulo de incidência solar;

$d_r$  está relacionado a distância relativa entre o sol e a Terra ao quadrado;

$\tau_{SW}$  é a transmitância atmosférica.

O valor calculado de radiação de ondas curtas incidentes é um valor constante sobre a área de estudo, assumindo condição de céu limpo de nuvens, para a hora de aquisição da imagem de satélite.

A radiação de ondas longas refletidas é o fluxo de radiação termal emitido da superfície da terra para a atmosfera (ALLEN et al, 2002), calculado com a Equação 4, de Stefan-Boltzmann.

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad \text{Equação 4}$$

Sendo  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>),  $T_s$  a temperatura da superfície, em K, e  $\varepsilon_0$  a emissividade da superfície. A temperatura da superfície é obtida a partir de informações da banda termal do sistema sensor.

Para continuidade do cálculo, o algoritmo SEBAL requer a escolha de dois pixels âncora na imagem que representem condições extremas, o quente e o frio, para determinação das condições de contorno do balanço energético. O pixel frio deve ser escolhido em uma área vegetada e úmida, na qual assume-se que o fluxo de calor latente é máximo e o de calor sensível é zero. Por outro lado, o pixel quente representa a situação contrária, em que o fluxo de calor latente é assumido como zero e o fluxo de calor sensível como máximo, característico de uma área seca e sem vegetação, onde não há ET. Os resultados finais do SEBAL são bastante sensíveis a escolha dos pixels extremos, sobretudo do pixel quente (WANG; SAMMIS; GUTSCHICK, 2009).

Allen et al. (2013) propuseram o método de escolha automática dos pixels quente e frio, tendo em vista a dependência destes pixels com a vegetação e a temperatura de superfície. Para a determinação do pixel frio, seleciona-se a família

dos 5% de pixels com maior vegetação (maiores índices NDVI) e, destes 5%, seleciona-se aqueles 20% com os menores valores de temperatura. Já para o pixel quente, escolhe-se os pixels com os 10% menores valores de NDVI e, então, os 20% com maior temperatura. Destes dois grupos obtidos, escolhe-se um único pixel frio e um quente, baseado na análise da temperatura, do albedo e da homogeneidade dos pixels nos seus entornos

Buscando refinar a escolha dos pixels âncora, Kich (2018) analisou diferentes porcentagens de NDVI e de temperatura da superfície, obtendo melhores resultados na estimativa de ET diária para os seguintes valores:

- Para a seleção do pixel frio: 5% com maiores índices de NDVI e 1% com menores temperaturas de superfície;
- Para a seleção do pixel quente: 10% com menores índices NDVI e 1% com maiores temperaturas de superfície.

A radiação de ondas longas incidentes é obtida através da equação modificada de Stefan-Boltzmann, conforme Equação 5, que utiliza a temperatura do pixel frio escolhido.

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_{frio}^4 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$\varepsilon_a$  é a emissividade atmosférica;

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ );

$T_{frio}$  é a temperatura do pixel frio selecionado.

Com os passos descritos até aqui, obtém-se o valor do fluxo instantâneo de radiação líquida, que varia, normalmente, de 100 a 700  $\text{W/m}^2$ , de acordo com a superfície. A partir daqui, deve-se obter os valores de fluxo de calor no solo (G) e de fluxo de calor sensível (H), para que seja possível calcular o fluxo de calor latente (LE) residual da equação de balanço energético.

### 3.3.1.2. Fluxo de calor no solo

O fluxo de calor no solo, representado pela variável G na equação de balanço energético da superfície, é obtido a partir da Equação 6.

$$G = \frac{T_s \times R_n}{\alpha} \times (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2) \times (1 - 0,98NDVI^4) \quad \text{Equação 6}$$

Onde  $T_s$  é a temperatura da superfície, em °C,  $\alpha$  é o albedo e NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada.

### 3.3.1.3. Fluxo de calor sensível

Por último, o fluxo de calor sensível, que representa o calor perdido para o ar através de convecção e condução, devido à diferença de temperatura, pode ser obtido aplicando a Equação 7 descrita a seguir.

$$H = \frac{(\rho \times c_p \times dT)}{r_{ah}} \quad \text{Equação 7}$$

Em que  $\rho$  é a densidade do ar, em  $\text{kg/m}^3$ ,  $c_p$  é o calor específico do ar ( $1004 \text{ J/kg/K}$ ),  $dT$  é a diferença de temperatura ( $T_1 - T_2$ ) entre duas alturas ( $z_1$  e  $z_2$ ) e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $\text{s/m}$ ).

No cálculo do fluxo de calor sensível, em função da existência de duas variáveis desconhecidas -  $H$  e  $dT$  -, usam-se os pixels âncora selecionados, nos quais são assumidos valores de  $H$ , conforme descrito anteriormente, e as diferenças de temperatura podem ser calculadas. A partir destes dois valores de  $dT$  obtidos, assume-se uma relação linear entre  $dT$  e a temperatura de superfície, e torna-se possível obter  $dT$  para o restante dos pixels da imagem estudada. Com os valores de  $dT$  para toda a imagem, obtém-se o fluxo de calor sensível para toda ela, partindo da premissa que a atmosfera está estável. O processo é repetido iterativamente, corrigindo a estabilidade atmosférica, e obtém-se o valor de calor sensível.

### 3.3.1.4. Fluxo de calor latente

Substituindo os valores obtidos de radiação líquida na superfície, de fluxo de calor sensível e de fluxo de calor no solo na Equação 1, obtém-se o valor de fluxo de calor latente instantâneo como residual do balanço energético. O valor encontrado, em  $\text{W/m}^2$ , representa o fluxo de calor instantâneo no momento da captura da imagem de satélite, e pode ser convertido para  $ET$ , em  $\text{mm/h}$ , através da Equação 8 a seguir.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo,  $ET_{inst}$  a evapotranspiração instantânea, em  $\text{mm/h}$ ; 3600 o fator de conversão de segundos para horas e  $\lambda$  o calor latente de vaporização, em  $\text{J/kg}$ .

E, por fim, calcula-se a fração evaporativa (FE) de acordo com a Equação 9, assumida como constante ao longo do dia, e, juntamente com os dados de saldo

líquido de radiação de 24 horas, converte-se a ET instantânea em ET diária, seguindo a Equação 10.

$$FE = \frac{LE}{(Rn - G)} \quad \text{Equação 9}$$

$$ET_{24h} = 0,0864 \times FE \times \frac{Rn_{24h}}{\lambda} \quad \text{Equação 10}$$

Em que  $ET_{24h}$  é a evapotranspiração diária, em mm, e  $Rn_{24h}$  é a radiação líquida diária.

### 3.3.2. LANDSAT

O programa de observação da Terra por satélites denominada LANDSAT teve início em 1972, em uma parceria da USGS (*U.S. Geological Survey*) com a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e, desde então, já foram lançados oito satélites (USGS, 2015). No total, são mais de 45 anos de imagens de satélite coletadas, com período de revisita de 16 dias e com média resolução espacial, que este programa fornece, servindo como recurso para o desenvolvimento de pesquisas em diferentes campos relacionados ao uso e à mudança da terra.

Os satélites LANDSAT diferem-se quanto as características de seus sensores, de suas resoluções e de suas bandas. As primeiras cinco missões (LANDSAT 1, 2, 3, 4 e 5), que atualmente não estão mais em órbita, apresentavam sensor MSS (*Multispectral Scanner*), que se caracteriza pela coleta de dados das bandas do visível e do infravermelho próximo. Nos satélites LANDSAT 4 e 5, além do sensor MSS, também havia a presença do sensor TM (*Thematic Mapper*), que apresenta bandas adicionais na parte do espectro de infravermelho médio, resolução espacial melhorada de 30 metros e adição da banda termal.

Dos dois satélites que atualmente estão em órbita, há o LANDSAT 7, equipado com o sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), que apresentou problemas, resultando em falhas na captura de 22% de imagens por este satélite (USGS, 2015). A missão mais recente, o LANDSAT 8, em órbita desde fevereiro de 2013, contém os sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). O OLI fornece dados semelhantes aos das missões anteriores, com resolução espacial de 30 metros nas regiões do espectro do visível, do infravermelho próximo e do

infravermelho médio, enquanto o sensor TIRS contém duas bandas termais, as bandas 10 e 11.

A Tabela 2 apresenta os detalhes dos dois satélites da missão LANDSAT que serão utilizados no trabalho: LANDSAT 5 e 8, que possuem dados sem falhas e presença de banda termal – necessária para análise da ET.

Tabela 2 - Informações das bandas dos satélites LANDSAT 5 e 8.

<b>Nome da banda</b>	<b>L8 OLI/TIRS</b>	<b>L5 TM</b>
Coastal/Aerosol	Banda 1	-
Azul	Banda 2	Banda 1
Verde	Banda 3	Banda 2
Vermelho	Banda 4	Banda 3
Infravermelho próximo (IVP)	Banda 5	Banda 4
	-	-
Infravermelho médio-1 (IVM-1)	Banda 6	Banda 5
Infravermelho médio-2 (IVM-2)	Banda 7	Banda 7
Pancromática (PAN)	Banda 8	-
Cirrus	Banda 9	-
Termal (T)	Banda 10	Banda 6
	Banda 11	-

Fonte: USGS, 2015.

Para o cálculo de ET com a aplicação do algoritmo SEBAL, são necessárias as bandas do espectro visível e do infravermelho (1 a 5 e 7 para o LANDSAT 5 e 2 a 7 para o LANDSAT 8) e a banda termal (6 para o LANDSAT 5 e 10 para o LANDSAT 8).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho está esquematizada na Figura 6, que mostra os passos que serão tomados e as informações necessárias que devem ser coletadas para obtenção dos objetivos definidos no item 2.

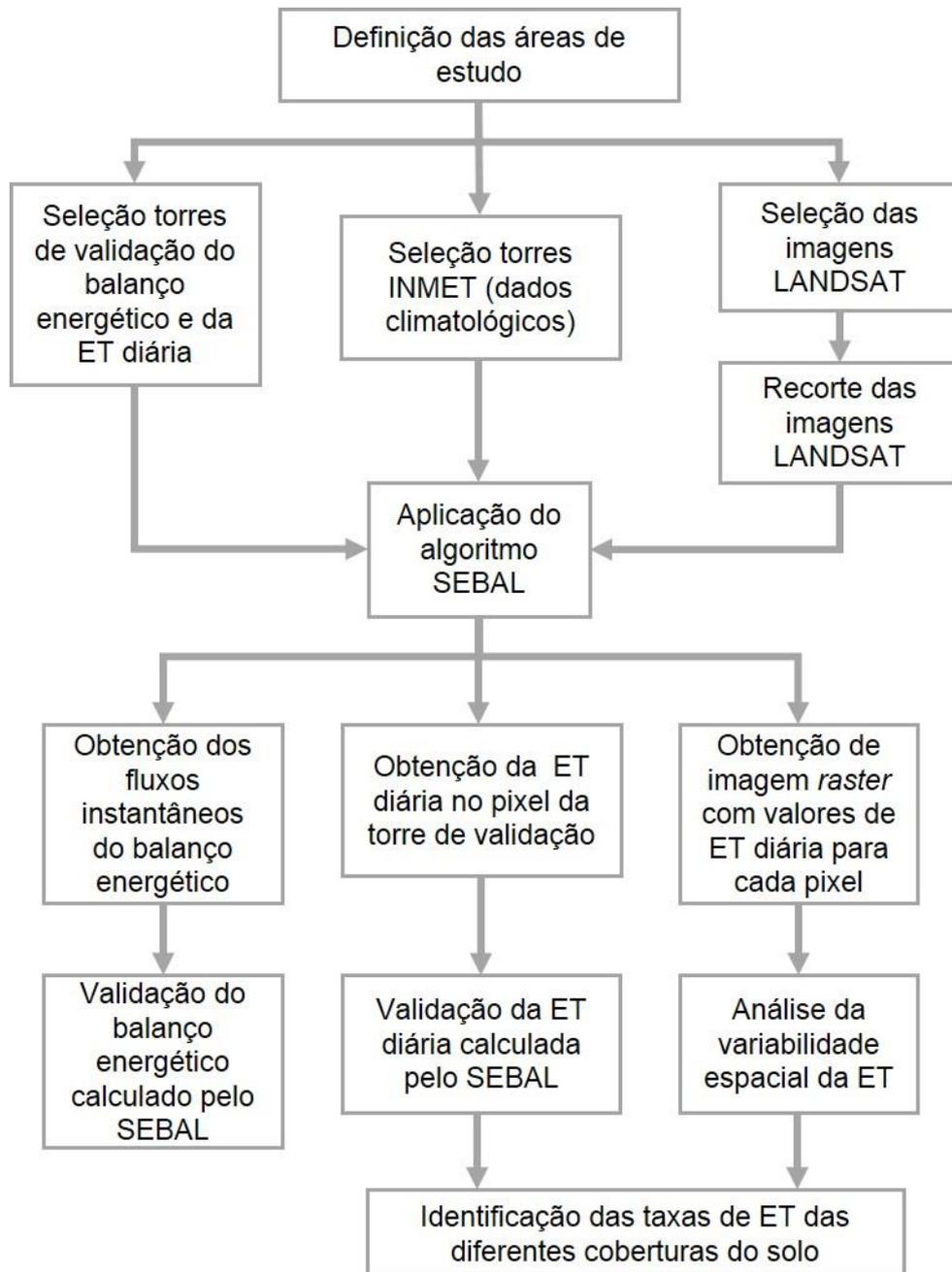


Figura 6 - Esquema da metodologia do trabalho.

Resumidamente, a metodologia consiste em identificar a taxa de ET diária em três diferentes áreas de estudo, com o uso de imagens do satélite LANDSAT. Os cálculos serão realizados com aplicação do algoritmo SEBAL, que requer, além das imagens de satélite, dados climatológicos medidos em campo.

Os resultados obtidos serão validados com dados medidos em torres micrometeorológicas, que estão situadas nas áreas de estudo, exatamente na cobertura do solo que se busca analisar.

A partir das taxas de ET estimadas para os três tipos de cobertura do solo, será analisado a demanda hídrica de diferentes cultivos agrícolas em relação a condições de vegetação natural.

A metodologia detalhada está descrita nos itens a seguir.

#### 4.1. ÁREAS DE ESTUDO

A identificação das taxas de ET será realizada em três diferentes condições de cobertura do solo:

1. Cultivo de arroz irrigado;
2. Cultivo de soja não-irrigada;
3. Condição natural de campo.

Para cada condição de cobertura do solo, foi selecionada uma área de estudo no estado do Rio Grande do Sul, todas inseridas no bioma pampa, característico do estado, em que se observa predomínio de vegetação de campo.

Segundo análise realizada por Kich (2018), resultados do uso do SEBAL com maiores acurácias podem ser obtidos com áreas que não se distanciem menos do que 30 km da origem dos dados de entrada. Portanto, as imagens de satélite selecionadas foram recortadas utilizando um buffer quadrado com distância de 30 km das torres micrometeorológicas utilizadas para validação, resultando em áreas quadradas, com 60 km de lado e 3600 km<sup>2</sup> de área.

A Figura 7 mostra a localização da área de estudo de cultivo de arroz irrigado, que abrange parcialmente territórios dos municípios de Formigueiro, São Sepé, Encruzilhada do Sul, Cachoeira do Sul, Santana da Boa Vista e Caçapava do Sul, no Rio Grande do Sul. A torre micrometeorológica de validação dos resultados situa-se no centro da área de estudo, no município de Cachoeira do Sul. A torre do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da qual serão obtidos os dados climáticos de entrada para a estimativa de ET, localiza-se em Santa Maria, fora da área analisada, a aproximadamente 75 km do centro da área de estudo. A cena LANDSAT que abrange esta área é a caracterizada pelo número 222-081.

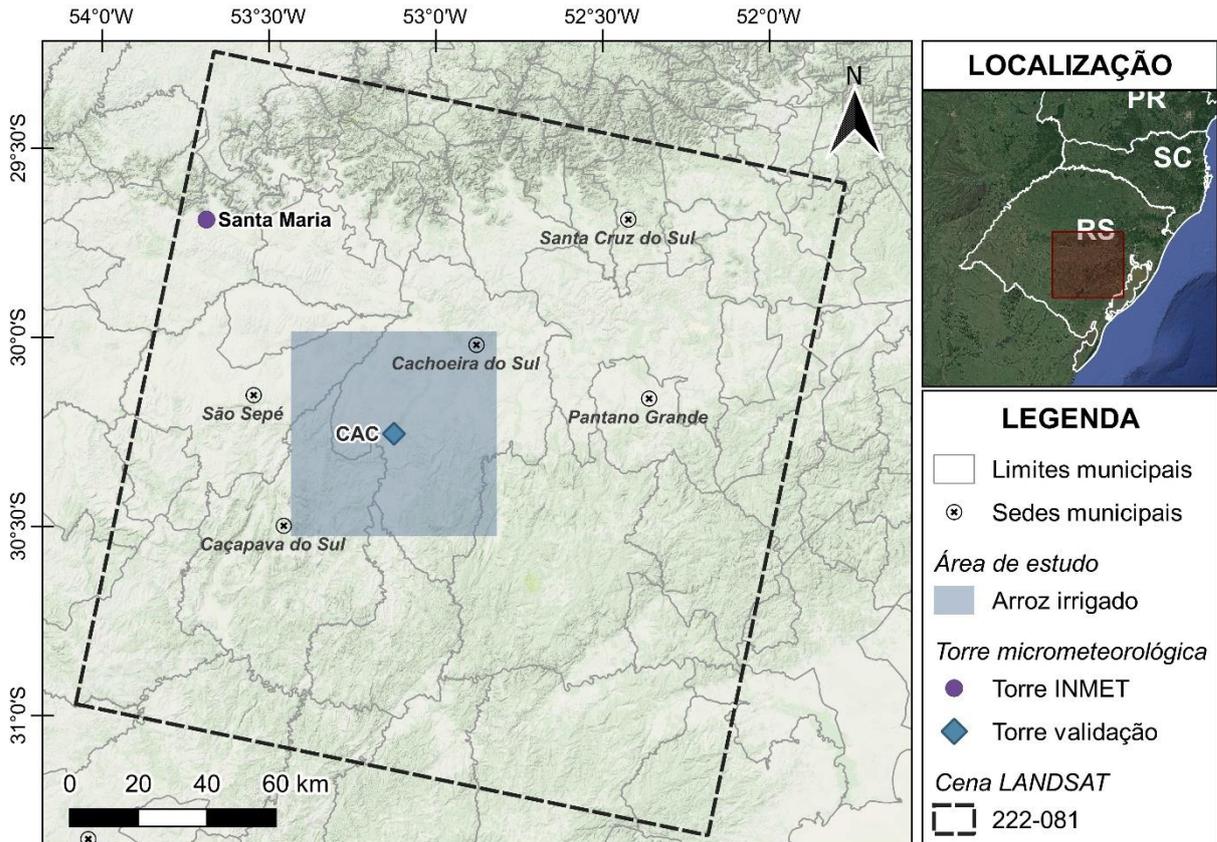


Figura 7 – Área de estudo de cultivo de arroz irrigado.

A Figura 8 mostra a área que será analisada de cultivo de soja, que cobre parcialmente partes dos municípios de Coronel Barros, Panambi, Boa Vista do Ingra, Jóia, Ibirubá, Cruz Alta, Augusto Pestana, Boa Vista do Cadeado, Bozano, Ijuí, Santa Barbara do Sul, Tupanciretã e Pejuçara, situada no interior da cena LANDSAT 223-080. Ambas as torres utilizadas no estudo, a de validação e a do INMET, estão localizadas dentro da área de estudo, no município de Cruz Alta, sendo a torre de validação exatamente no centro da área.

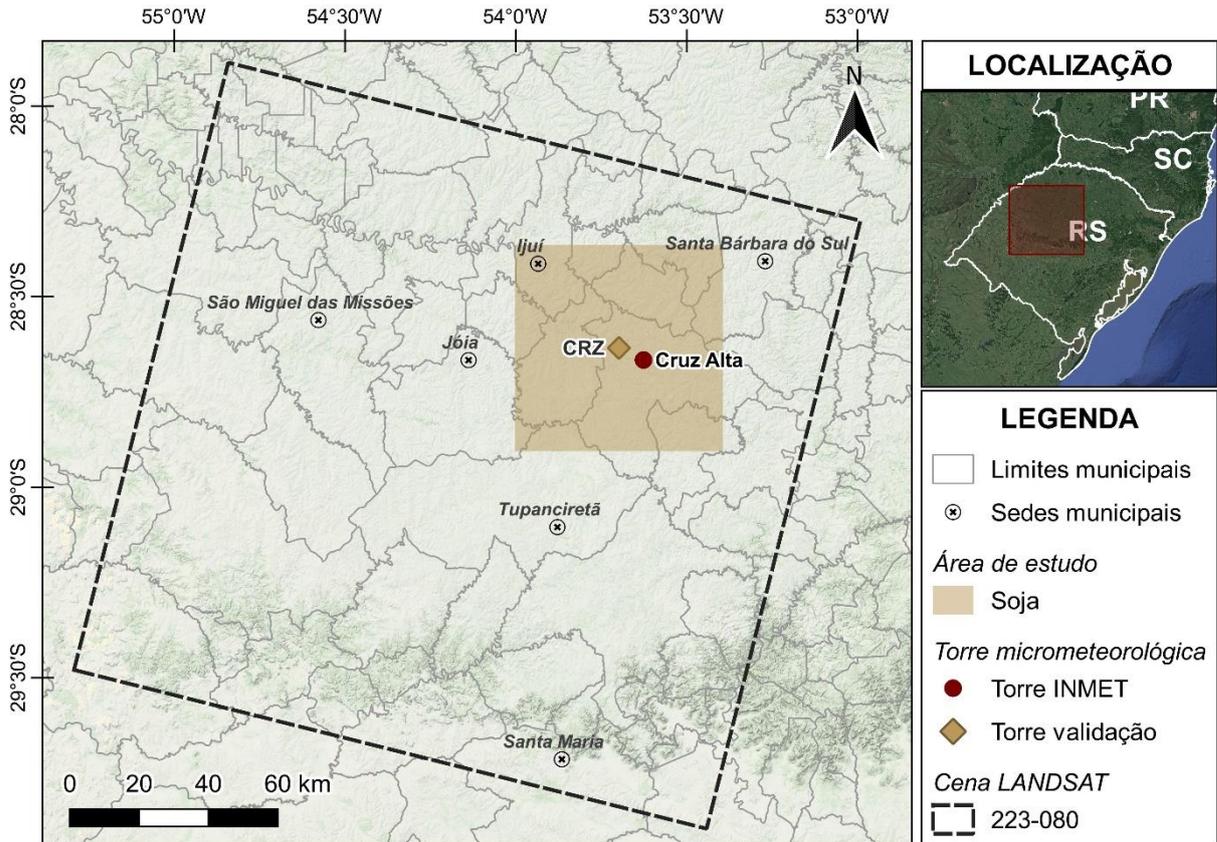


Figura 8 - Área de estudo de cultivo de soja.

A área estudada em condições naturais de campo, delimitada na Figura 9, situa-se no limite de diferentes cenas LANDSAT, optando-se pelo uso da cena 223-081. Por este motivo, fez-se necessário deslocar a área de estudo para noroeste, de modo a ser coberta inteiramente pela cena LANDSAT, não sendo possível manter a torre de validação no centro da área, como nas áreas de cultivo de arroz e de soja, descritas anteriormente. Os municípios abrangidos em parte pela área de estudo são São Pedro do Sul, Restinga Seca, Faxinal do Soturno, Itaara, Silveira Martins, São Sepé, São Gabriel, Santa Maria, Dilermando Aguiar, São João do Polêsine e Formigueiro, sendo Santa Maria o local onde situa-se as torres utilizadas, de validação e do INMET.

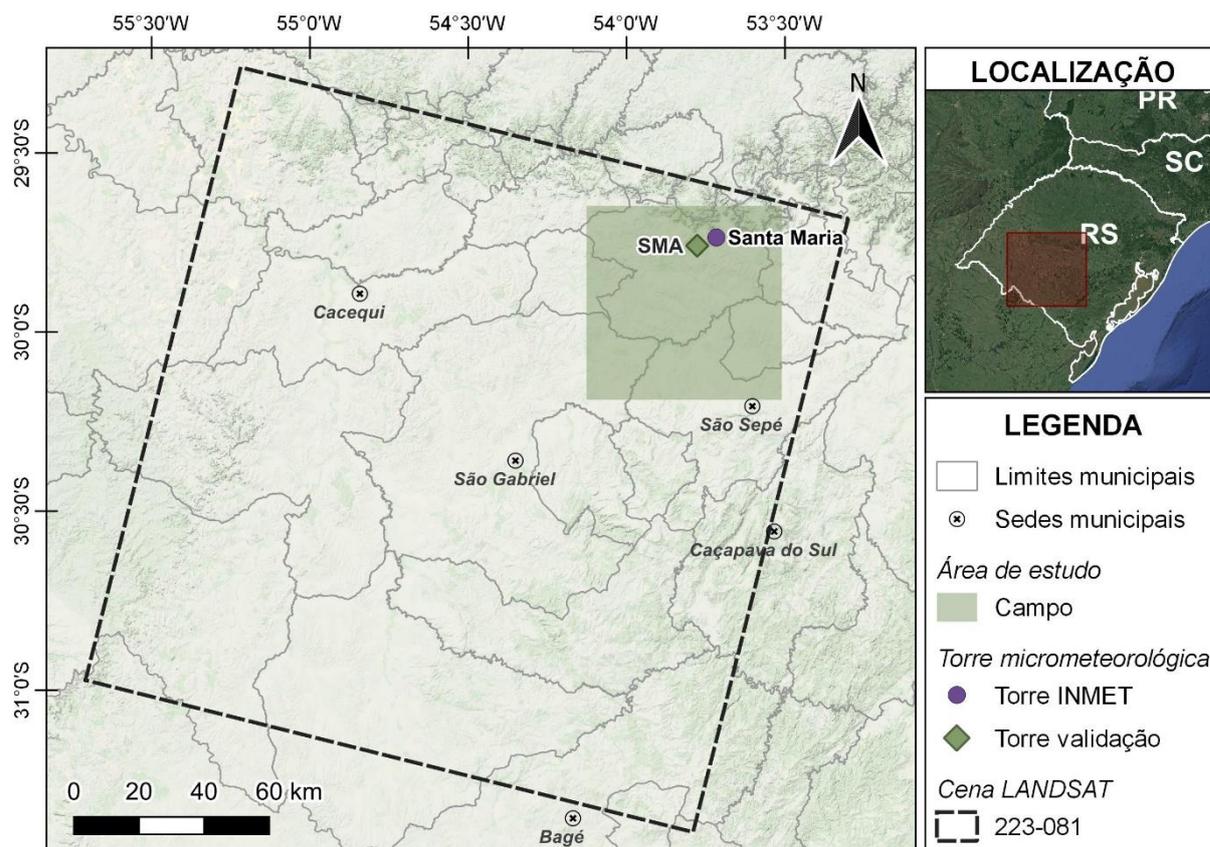


Figura 9 – Área de estudo de campo.

#### 4.2. IMAGENS LANDSAT

Selecionou-se preferencialmente imagens do satélite LANDSAT 8, por ainda estar em órbita e possuir dados mais recentes, em comparação ao LANDSAT 5, também utilizado no estudo.

A seleção das imagens LANDSAT deve considerar, primeiramente, a cobertura de nuvens no céu no momento de aquisição da imagem. Conforme Allen et al (2002), é importante que as imagens de satélite utilizadas no SEBAL sejam de dias de céu limpo, pois a presença de nuvens exerce influência sobre a leitura da banda termal das imagens, podendo resultar em erros consideráveis na estimativa da ET. Portanto, selecionou-se o critério de cobertura de nuvens inferior a 20% e, separadamente, analisou-se cada uma das imagens na região específica de estudo, com a finalidade de garantir o requisito de um céu livre de nuvens.

Como segundo critério para a seleção das imagens de satélite, verificou-se a disponibilidade de dados das torres micrometeorológicas estudadas na data e na hora de aquisição da imagem, para posterior validação dos resultados.

Para cada área de estudo, considerando os critérios descritos, foi possível selecionar 7 imagens de satélite, capturadas dentro do período de dados disponíveis nas torres de validação e livres de nuvens.

A área de estudo de cultivo de arroz irrigado encontra-se no interior da cena LANDSAT 222-081. A hora de aquisição da imagem de satélite no centro desta cena é as 10 horas e 25 minutos da manhã, aproximadamente. As imagens selecionadas para esta área, e a data de aquisição de cada uma das imagens, estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Imagens LANDSAT selecionadas para a área de estudo de cultivo de arroz irrigado.

LANDSAT	Identificação da imagem	Data	Imagem
8	LC08_L1TP_222081_20141128_20170417_01_T1	28-nov-14	Arroz 1
	LC08_L1TP_222081_20141027_20170418_01_T1	27-out-14	Arroz 2
	LC08_L1TP_222081_20140909_20170419_01_T1	09-set-14	Arroz 3
	LC08_L1TP_222081_20140128_20170426_01_T1	28-jan-14	Arroz 4
	LC08_L1TP_222081_20131125_20170428_01_T1	25-nov-13	Arroz 5
	LC08_L1TP_222081_20131008_20170429_01_T1	08-out-13	Arroz 6
5	LT05_L1TP_222081_20110901_20161006_01_T1	01-set-11	Arroz 7

A área de cultivo de soja situa-se no interior da cena LANDSAT 223-080 e a Tabela 4 mostra as imagens de satélite selecionadas desta cena para este estudo. No centro desta cena, a captura da imagem de satélite ocorre por volta das 10 horas e 30 minutos.

Tabela 4 - Imagens LANDSAT selecionadas para a área de estudo de cultivo de soja.

LANDSAT	Identificação da imagem	Data	Imagem
8	LC08_L1TP_223080_20140119_20170426_01_T1	19-jan-2014	Soja 1
	LC08_L1TP_223080_20131116_20170428_01_T1	16-nov-2013	Soja 2
	LC08_L1TP_223080_20130913_20170502_01_T1	13-set-2013	Soja 3
	LC08_L1TP_223080_20130422_20170505_01_T1	22-abr-2013	Soja 4
5	LT05_L1TP_223080_20100209_20161016_01_T1	09-fev-2010	Soja 5
	LT05_L1TP_223080_20090121_20161028_01_T1	21-jan-2009	Soja 6
	LT05_L1TP_223080_20090105_20161028_01_T1	05-jan-2009	Soja 7

A área de campo estudada neste trabalho encontra-se entre duas cenas LANDSAT: 223-080 e 223-081, optando-se por utilizar a última, por cobrir melhor a área a ser estudada. No centro da cena 223-081, a aquisição da imagem é realizada, em cada revisita, por volta das 10 horas e 30 minutos. A Tabela 5 lista as imagens de satélite selecionadas para esta área de estudo.

Tabela 5 - Imagens LANDSAT selecionadas para a área de estudo de campo.

LANDSAT	Identificação da imagem	Data	Imagem
8	LC08_L1TP_223081_20151208_20170401_01_T1	08-dez-15	Campo 1
	LC08_L1TP_223081_20151122_20170401_01_T1	22-nov-15	Campo 2
	LC08_L1TP_223081_20150615_20170407_01_T1	15-jun-15	Campo 3
	LC08_L1TP_223081_20141205_20170416_01_T1	05-dez-14	Campo 4
	LC08_L1TP_223081_20140527_20170422_01_T1	27-mai-14	Campo 5
	LC08_L1TP_223081_20140324_20170424_01_T1	24-mar-14	Campo 6
	LC08_L1TP_223081_20140119_20170426_01_T1	19-jan-14	Campo 7

Todas as imagens de satélite usadas no trabalho foram obtidas em USGS (2018). Juntamente com as bandas multiespectrais e termiais, estão disponíveis imagens processadas com informações dos índices de vegetação NDVI e SAVI, necessários para o cálculo no SEBAL.

#### 4.3. SEBAL

Os cálculos de ET foram realizados em rotina no software Matlab, codificada por Kich (2018), que inclui as equações e procedimentos do método SEBAL descritos anteriormente. Os dados de entrada para obtenção do resultado são:

- As sete bandas – 6 multiespectrais e 1 termal – com correção atmosférica das imagens LANDSAT selecionadas no item anterior;
- Um arquivo de metadados, com dados para todas as imagens de satélite selecionadas de: temperatura, velocidade do vento, umidade relativa, altitude, altura da vegetação no entorno da torre, altura de medição de dados na torre micrometeorológica e radiação diária disponível (APÊNDICE A);
- Índices NDVI e temperatura de superfície para seleção automática dos pixels ancora, que, neste trabalho, serão escolhidos utilizando os valores propostos por Kich (2018) de 0,05 (NDVI) e 0,01 (Ts) para o pixel frio e de 0,1 (NDVI) e 0,01 (Ts) para o pixel quente;
- Coordenadas geográficas de localização das torres de validação, para obtenção dos valores calculados exatamente neste ponto.

Os dados meteorológicos necessários de temperatura, de velocidade do vento e de umidade relativa para entrada no modelo SEBAL foram obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (INMET, 2018). As estações utilizadas neste trabalho são a do município de Santa Maria, localizada nas coordenadas 29,7°

sul e 53,7° oeste, para as áreas de arroz irrigado e de campo, e a de Cruz Alta, situada nas coordenadas 28,63° sul e 53,6° oeste, para a área de estudo de cultivo de soja.

Os dados de radiação diária necessários para o cálculo da evapotranspiração diária foram obtidos das torres micrometeorológicas, descritas no item a seguir.

Como saída, obtém-se os valores intermediários, de fluxo instantâneo, e os valores de ET diária, além de imagens *raster*, com valores de ET para cada pixel, que ilustram a variabilidade espacial da ET.

#### 4.4. TORRES MICROMETEOROLÓGICAS

Em cada uma das três áreas de estudo, há uma torre micrometeorológica instalada e operada pelo projeto denominado Rede Sulflux. Os dados medidos nas torres foram utilizados para validação dos valores de componentes do balanço energético e de ET diária estimados por meio das imagens de satélite com o algoritmo SEBAL no pixel onde situa-se a torre. A medição dos dados climáticos e de fluxos nas torres micrometeorológicas baseia-se no método de vórtices turbulentos.

No município de Cachoeira do Sul, há a torre utilizada neste trabalho para validação dos resultados obtidos para a área de estudo cultivo de arroz irrigado, identificada pela sigla CAC. A torre opera desde 2009 e está situada em uma plantação de arroz irrigado, conforme ilustram as fotografias fornecidas pelo projeto Sulflux na Figura 10.



Figura 10 - Torre micrometeorológica de Cachoeira do Sul (CAC) e área de cultivo de arroz do entorno. (Fonte: Rede Sulflux).

A área de cultivo de soja teve os seus resultados validados pela torre micrometeorológica localizada no município de Cruz Alta e identificada por CRZ. Nas fotografias da Figura 11 observa-se a torre, operada desde 2009, e a área de cultivo de soja do seu entorno.



Figura 11 - Torre micrometeorológica de Cruz Alta (CRZ) e área de cultivo de soja do entorno. (Fonte: Rede Sulflux).

Para validação dos resultados obtidos na área de condição natural de campo, foram utilizados os dados observados na torre micrometeorológica do projeto Sulflux localizada no município de Santa Maria. Esta torre, identificada pela sigla SMA e apresentada na Figura 12, possui dados disponíveis desde 2013.



Figura 12 - Torre micrometeorológica de Santa Maria (SMA) (Fonte: Rede Sulflux).

A Tabela 6 apresenta um resumo das características das três torres micrometeorológicas utilizadas no estudo.

Tabela 6 - Resumo das características das torres micrometeorológicas utilizadas.

Identificação da torre	Localização	Coordenadas	Cobertura do solo no entorno	Período de dados disponíveis
CAC	Cachoeira do Sul	30°16'37.51"S 53° 8'52.46"O	Arroz irrigado	25/12/2010 – 30/03/2015
CRZ	Cruz Alta	28°36'12.94"S 53°40'24.97"O	Soja	01/01/2009 – 06/09/2014
SMA	Santa Maria	29°43'27.41"S 53°45'36.01"O	Campo	20/11/2013 – 31/12/2016

Na validação dos resultados, são apresentadas as diferenças dos valores calculados pelo SEBAL em relação aos valores observados nas torres micrometeorológicas, em número absoluto (Equação 11) e percentual (Equação 12), para cada imagem estudada.

$$Diferença = |observado - calculado| \quad \text{Equação 11}$$

$$Diferença (\%) = \frac{|observado - calculado|}{observado} \times 100 \quad \text{Equação 12}$$

Onde observado refere-se ao valor observado em campo, medido nas torres micrometeorológicas, e calculado refere-se ao valor calculado pelo modelo SEBAL.

Para verificação da acurácia dos resultados, foi calculada a raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada área de estudo, conforme Equação 13. O erro RMSE é apresentado na unidade de medida do parâmetro analisado: W/m<sup>2</sup> para as componentes de fluxo do balanço energético e mm para a ET diárias, além de valores percentuais, obtidos pela Equação 14.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\text{observado} - \text{calculado})^2}{n}} \quad \text{Equação 13}$$

$$RMSE (\%) = \frac{RMSE}{\overline{\text{observados}}} \times 100 \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

$n$  = número de imagens analisadas na área de estudo;

$\overline{\text{observados}}$  = a média dos valores observados na área de estudo.

## 5. RESULTADOS

Nos itens a seguir são apresentados os resultados obtidos para as três áreas estudadas: de cultivo de arroz irrigado, de cultivo de soja e de vegetação natural do bioma pampa. Primeiramente, no item 5.1, foram validados os resultados intermediários do cálculo do balanço energético, em termos instantâneos. No item 5.2, foram validados e analisados os resultados de ET diária para as três áreas de estudos. Por último, no item 5.2.2, compararam-se os resultados obtidos neste trabalho com outros trabalhos desenvolvidos na área.

### 5.1. VALIDAÇÃO DO BALANÇO ENERGÉTICO

Considerando a Equação 1 do balanço energético em superfície, base para os cálculos do SEBAL, há quatro parâmetros que podem ser analisados e comparados com os dados de campo para validação do algoritmo: o saldo de radiação líquida, o fluxo de calor no solo, o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente. Neste item, foram trabalhados dados instantâneos, correspondentes a hora de aquisição da imagem de satélite. Salieta-se que, para a validação, foram extraídos os valores calculados pelo algoritmo no pixel da imagem de satélite onde localiza-se a torre micrometeorológica. O fluxo de calor no solo não foi analisado por não haver disponibilidade deste dado para as torres CRZ e CAC.

Na Tabela 7, são apresentados os resultados do componente do balanço energético de saldo de radiação líquida.

Tabela 7 – Diferenças entre os valores calculados e observados de saldo de radiação líquida ( $R_n$ ) instantâneo.

Área de estudo	Imagem	Data	Calculado ( $W/m^2$ )	Observado ( $W/m^2$ )	Diferença	
					$W/m^2$	%
Arroz	Arroz 1	28-nov-14	740,4	740,1	0,3	0%
	Arroz 2	27-out-14	670,6	683,1	12,5	2%
	Arroz 3	09-set-14	467,7	473,7	6,0	1%
	Arroz 4	28-jan-14	583,7	595,2	11,5	2%
	Arroz 5	25-nov-13	694,9	705,8	10,9	2%
	Arroz 6	08-out-13	664,7	628,4	36,3	6%
	Arroz 7	01-set-11	440,4	339,4	100,9	30%
Soja	Soja 1	19-jan-2014	548,2	556,0	7,8	1%
	Soja 2	16-nov-2013	607,1	588,8	18,3	3%
	Soja 3	13-set-2013	461,4	298,3	163,1	55%
	Soja 4	22-abr-2013	374,6	297,2	77,4	26%
	Soja 5	09-fev-2010	548,2	468,2	80,0	17%
	Soja 6	21-jan-2009	580,0	503,2	76,8	15%

Área de estudo	Imagem	Data	Calculado (W/m <sup>2</sup> )	Observado (W/m <sup>2</sup> )	Diferença	
					W/m <sup>2</sup>	%
	Soja 7	05-jan-2009	576,5	528,1	48,4	9%
Campo	Campo 1	08-dez-15	654,7	670,3	15,6	2%
	Campo 2	22-nov-15	652,2	676,3	24,1	4%
	Campo 3	15-jun-15	281,2	272,5	8,7	3%
	Campo 4	05-dez-14	645,5	672,5	27,0	4%
	Campo 5	27-mai-14	313,4	318,1	4,7	1%
	Campo 6	24-mar-14	492,5	486,8	5,7	1%
	Campo 7	19-jan-14	603,2	620,3	17,0	3%

A diferença dos resultados de radiação líquida calculados pelo SEBAL em relação aos observados na torre da área de arroz irrigado variou entre 0,3, para a imagem Arroz 1, e 100,9 W/m<sup>2</sup>, para a imagem Arroz 7. A imagem de satélite Arroz 7 apresentou a maior diferença também em termos percentuais, com um valor calculado 30% superior ao valor medido. O restante das imagens apresentou resultados com grande acurácia, com diferenças variando entre 0% e 6%.

Na área de cultivo de soja, das 7 imagens analisadas, 6 apresentaram valores calculados superiores aos valores medidos em campo. As imagens de satélite Soja 3 e Soja 4 apresentaram as maiores diferenças, de 55 e 26%, respectivamente.

Entre as três áreas estudadas, a área de campo apresentou a maior acurácia e a maior precisão na validação dos resultados de radiação líquida, com diferenças entre os valores observados e calculados variando de 1 a 4%. As maiores diferenças observadas ocorreram nas imagens Campo 2 e Campo 4, com diferenças de 24,12 e 26,97 W/m<sup>2</sup> em relação ao valor medido em campo.

A Figura 13 ilustra graficamente a dispersão dos valores calculados e observados de saldo de radiação líquida. A linha pontilhada no gráfico representa o que seria esperado nos resultados, em que o valor observado é igual ao calculado.

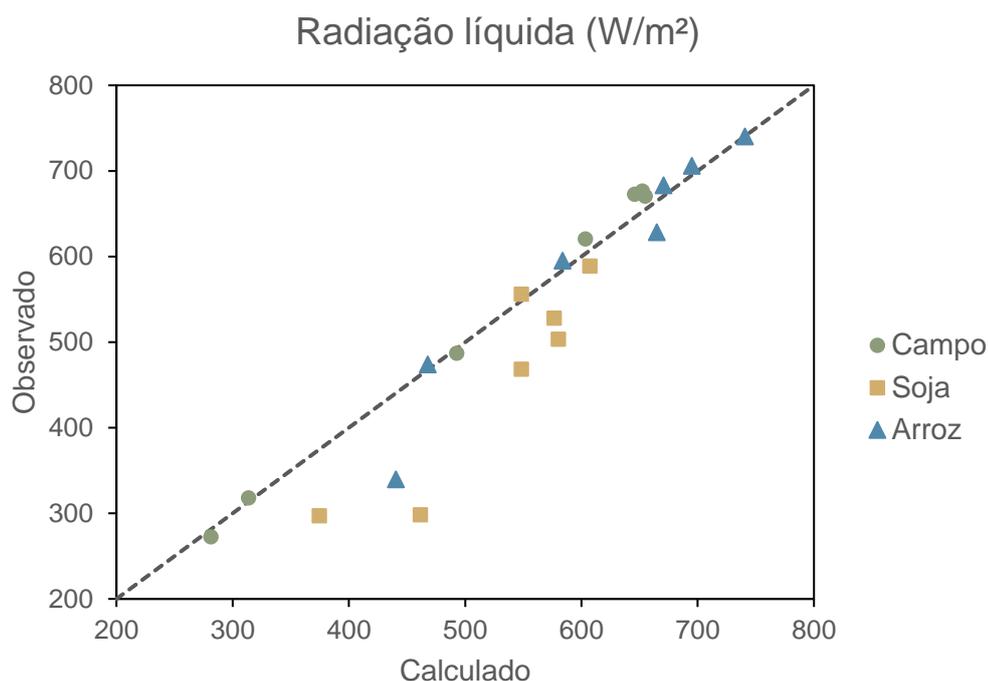


Figura 13 – Dispersão dos valores calculados em comparação aos valores observados para a radiação líquida.

O saldo de radiação líquida instantâneo calculado pelo SEBAL apresentou diferença entre os dados estimados e observados variando entre 0,3 e 163,1  $W/m^2$  em comparação aos valores medidos nas torres pelo método de covariância de vórtices turbulentos.

Quanto ao fluxo instantâneo de calor sensível, os valores calculados e observados, em  $W/m^2$ , e as diferenças entre eles, em  $W/m^2$  e %, para as três áreas são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Diferenças entre os valores calculados e observados de fluxo de calor sensível (H) instantâneo.

Área de estudo	Imagem	Data	Calculado ( $W/m^2$ )	Observado ( $W/m^2$ )	Diferença	
					$W/m^2$	%
Arroz	Arroz 1	28-nov-14	83,5	56,0	27,5	49%
	Arroz 2	27-out-14	48,5	49,6	1,1	2%
	Arroz 3	09-set-14	161,3	83,5	77,8	93%
	Arroz 4	28-jan-14	39,4	34,0	5,5	16%
	Arroz 5	25-nov-13	39,7	25,2	14,5	57%
	Arroz 6	08-out-13	35,7	27,9	7,8	28%
	Arroz 7	01-set-11	86,9	57,0	29,9	52%
Soja	Soja 1	19-jan-2014	67,7	105,0	37,3	36%
	Soja 2	16-nov-2013	195,2	180,4	14,8	8%
	Soja 3	13-set-2013	97,3	162,5	65,2	40%
	Soja 4	22-abr-2013	114,4	217,2	102,9	47%

Área de estudo	Imagem	Data	Calculado (W/m <sup>2</sup> )	Observado (W/m <sup>2</sup> )	Diferença	
					W/m <sup>2</sup>	%
	Soja 5	09-fev-2010	38,4	54,7	16,3	30%
	Soja 6	21-jan-2009	132,0	108,2	23,8	22%
	Soja 7	05-jan-2009	176,2	170,4	5,8	3%
Campo	Campo 1	08-dez-15	132,0	232,4	100,4	43%
	Campo 2	22-nov-15	154,4	251,7	97,3	39%
	Campo 3	15-jun-15	88,3	109,4	21,1	19%
	Campo 4	05-dez-14	149,5	183,6	34,0	19%
	Campo 5	27-mai-14	60,3	118,8	58,6	49%
	Campo 6	24-mar-14	110,3	188,6	78,4	42%
	Campo 7	19-jan-14	62,3	106,0	43,7	41%

Observa-se que as diferenças percentuais obtidas na validação dos resultados de fluxo instantâneo de calor sensível são bastante superiores as obtidas na validação da radiação líquida.

Na área de arroz, onde situa-se a torre CAC, a diferença variou entre 2 e 93%. O melhor resultado desta área foi na validação da imagem Arroz 2, que apresentou diferença entre os dados estimados e observados de apenas 1,1 W/m<sup>2</sup>, equivalente a uma diferença percentual de 2%.

Na área de soja, na torre CRZ, a diferença variou entre 3 e 47%, apresentando os piores valores de acurácia para as imagens Soja 3 e Soja 4, com diferenças de 65,2 e 102,9 W/m<sup>2</sup>.

No local da torre SMA, situada na área de campo, a diferença percentual foi bastante elevado, variando entre 19 e 49%, com a maior diferença observada entre os dados medidos e os calculados de 100,44 W/m<sup>2</sup>, para a imagem Campo 1.

A Figura 14 ilustra a dispersão dos valores calculados através do algoritmo SEBAL em comparação com os valores observados em campo nas torres micrometeorológicas.

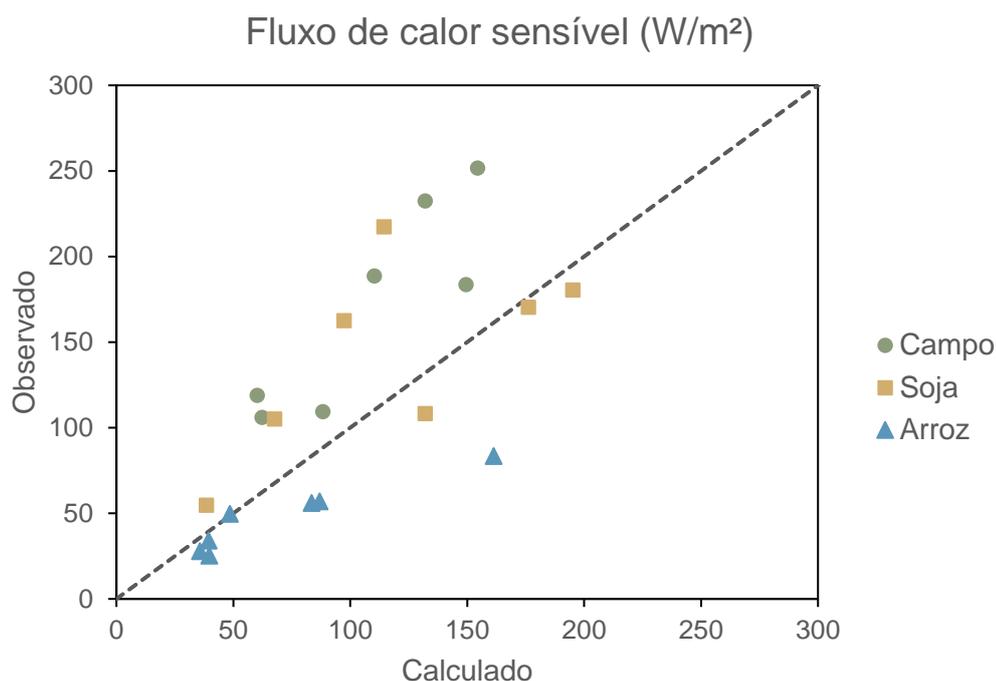


Figura 14 – Dispersão dos valores calculados em comparação aos valores observados para o fluxo de calor sensível.

Ao comparar os valores de fluxo sensível calculados no pixel onde situam-se as torres micrometeorológicas com os valores medidos por elas, observou-se uma baixa acurácia e baixa precisão nos cálculos do SEBAL para esta componente do balanço energético. Com exceção das imagens analisadas na área de cultivo de arroz, a maioria das imagens das outras duas áreas apresentou valores observados superiores aos calculados pelo modelo.

Em relação ao fluxo instantâneo de calor latente, a Tabela 9 apresenta os valores calculados e observados e a diferença do calculado em relação ao observado.

Tabela 9 – Diferenças entre os valores calculados e observados de fluxo de calor latente (LE) instantâneo.

Área de estudo	Imagem	Data	Calculado ( $W/m^2$ )	Observado ( $W/m^2$ )	Diferença	
					$W/m^2$	%
Arroz	Arroz 1	28-nov-14	444,2	Falha	--	--
	Arroz 2	27-out-14	421,0	237,6	183,3	77%
	Arroz 3	09-set-14	184,3	220,0	35,7	16%
	Arroz 4	28-jan-14	473,9	331,6	142,3	43%
	Arroz 5	25-nov-13	447,0	269,0	178,0	66%
	Arroz 6	08-out-13	296,7	196,0	100,7	51%
	Arroz 7	01-set-11	221,4	75,6	145,8	193%
Soja	Soja 1	19-jan-2014	325,5	433,0	107,5	25%
	Soja 2	16-nov-2013	232,3	428,7	196,4	46%

Área de estudo	Imagem	Data	Calculado (W/m <sup>2</sup> )	Observado (W/m <sup>2</sup> )	Diferença	
					W/m <sup>2</sup>	%
	Soja 3	13-set-2013	233,0	140,4	92,6	66%
	Soja 4	22-abr-2013	148,3	102,7	45,6	44%
	Soja 5	09-fev-2010	432,9	470,5	37,6	8%
	Soja 6	21-jan-2009	305,6	361,9	56,2	16%
	Soja 7	05-jan-2009	242,4	320,0	77,6	24%
Campo	Campo 1	08-dez-15	370,4	281,4	89,0	32%
	Campo 2	22-nov-15	333,3	255,9	77,3	30%
	Campo 3	15-jun-15	119,7	261,4	141,7	54%
	Campo 4	05-dez-14	314,4	250,3	64,1	26%
	Campo 5	27-mai-14	174,7	3,5	171,3	4929%
	Campo 6	24-mar-14	247,1	117,2	129,9	111%
	Campo 7	19-jan-14	414,8	250,7	164,2	65%

Para a área de arroz irrigado, a imagem Arroz 1 apresentou falha na medição do dado de fluxo de calor instantâneo no horário de aquisição da imagem de satélite. Das outras 6 imagens estudadas, 5 obtiveram valores de fluxo de calor latente instantâneo calculados superiores aos observados. As diferenças na validação dos resultados variaram entre 16 e 193%, sendo os maiores valores observados nas imagens Arroz 5 e Arroz 7, com diferenças de 66 e 193%, respectivamente.

A validação dos valores calculados pelo SEBAL na área de cultivo de soja também não apresentou grande acurácia, mas apresentou valores mais baixos, variando de 8 a 66%. A imagem Soja 2, ainda que não tenha apresentado a maior diferença percentual, apresentou a maior diferença absoluta entre o valor calculado e medido, de 196,40 W/m<sup>2</sup>.

Os valores calculados na área de campo apresentaram baixa acurácia nos resultados calculados pelo SEBAL. As imagens com melhores acurácias no resultado calculado pelo algoritmo foram Campo 1, 2 e 4, com diferenças de 89,0, 77,3 e 64,1 W/m<sup>2</sup>, respectivamente.

Na imagem Campo 5, de 27 de maio de 2014, observou-se uma diferença de 4929% do valor calculado em relação ao observado, que se justifica pelo valor extremamente baixo medido na torre. Este baixo valor de fluxo de calor latente, de 3,47 W/m<sup>2</sup>, incomum para o horário analisado de medição, deve ser consequência de erro operacional na medição da torre micrometeorológica. Os valores de LE medidos nas horas anteriores e posteriores ao horário analisado são superiores a este valor,

comprovando a fonte de erro do dado medido neste horário. Portanto, para cálculo do RMSE da área de campo, esta imagem será desconsiderada.

A baixa acurácia dos resultados obtidos pode ser visualizada na Figura 15, que mostra a dispersão dos resultados calculados em relação aos dados observados para as três áreas, sendo a linha pontilhada o resultado que se busca alcançar.

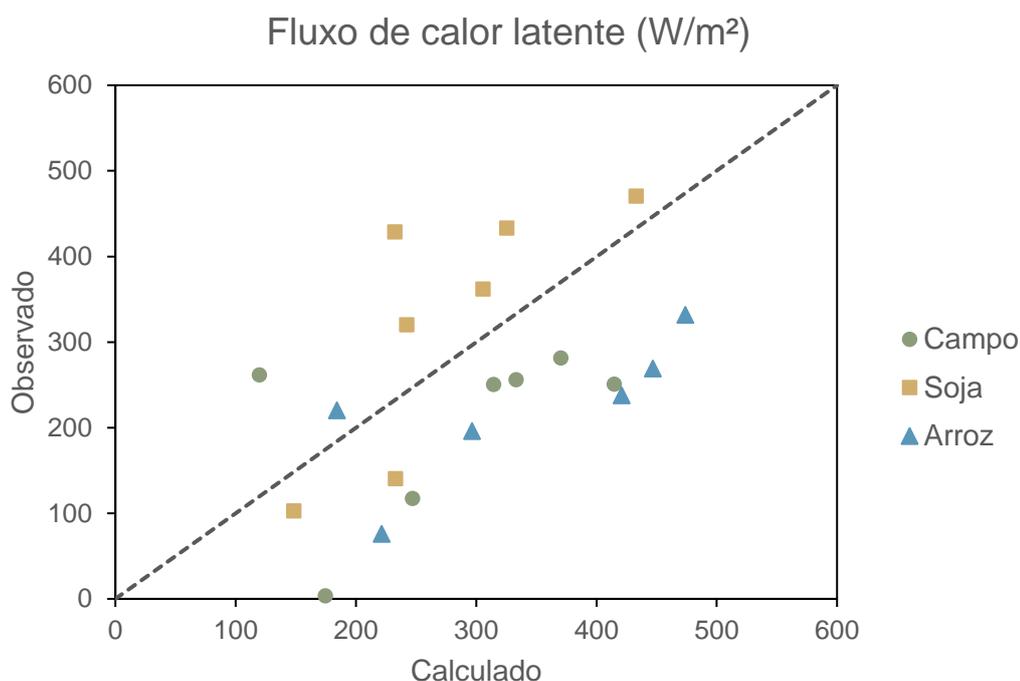


Figura 15 – Dispersão dos valores calculados em comparação aos valores observados para o fluxo de calor latente.

Na análise do gráfico da Figura 15, observa-se que os valores calculados nas áreas de estudo de campo e de arroz irrigado foram superestimados em relação aos valores medidos em *in situ*, enquanto os valores calculados na área de cultivo de soja foram subestimados.

A partir dos valores observados e calculados pelo SEBAL para cada área de estudo, calculou-se o RMSE, em  $W/m^2$  e em %, dos três componentes do balanço energético analisados. A Tabela 10 apresenta os erros obtidos.

Tabela 10 – RMSE, em  $W/m^2$  e %, obtidos nas três áreas de estudo.

Área de estudo	Radiação líquida		Fluxo de calor sensível		Fluxo de calor latente	
	RMSE ( $W/m^2$ )	RMSE (%)	RMSE ( $W/m^2$ )	RMSE (%)	RMSE ( $W/m^2$ )	RMSE (%)
<b>Arroz irrigado</b>	41,3	7%	33,8	71%	140,4	63%
<b>Soja</b>	82,5	18%	49,7	35%	101,0	31%
<b>Campo</b>	16,8	3%	68,3	40%	116,8	49%

Em relação as três componentes do balanço hídrico analisadas, o saldo de radiação líquida apresentou a melhor acurácia, quando os resultados calculados pelo SEBAL foram comparados aos dados medidos nas torres micrometeorológicas. Na validação dos valores de radiação, obteve-se RMSE de 7% para a área de arroz irrigado, de 18% para a área de soja e de 3% para a área de campo.

Os resultados obtidos de fluxo instantâneo de calor sensível e latente tiveram baixa acurácia e baixa precisão. Para os fluxos de calor, os valores de RMSE variaram entre 31 e 71%, sendo os menores valores observados na área de cultivo de soja e os maiores na área de cultivo de arroz irrigado.

## 5.2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA

No item 5.2.1, serão validados os resultados de ET diária com os dados observados em campo nas torres micrometeorológicas, seguindo a mesma metodologia da validação dos parâmetros intermediários da equação do balanço hídrico, realizada no item anterior.

Nos itens subsequentes 5.2.3 e 5.2.2, busca-se apresentar e discutir a variabilidade temporal e espacial, respectivamente, da ET diária para as três áreas de estudo. A variabilidade temporal será discutida de acordo com a época do ano que a imagem foi adquirida, relacionando-a a etapa de crescimento dos cultivos e a condição climática observada no estado do Rio Grande do Sul. A variabilidade espacial será apresentada por meio das imagens obtidas como saída da simulação no modelo SEBAL. Para cada área estudada, foi selecionada uma imagem de satélite do mês de janeiro para apresentar a variabilidade espacial da ET.

### 5.2.1. Validação

A ET diária não é medida diretamente na torre micrometeorológica, como os fluxos instantâneos validados anteriormente. Para esta validação, utilizou-se o valor médio diário de fluxo de calor latente medido, convertido para ET, em mm. Falhas observadas em determinados horários ao longo do dia não foram incluídas no cálculo do valor médio.

A Tabela 11 apresenta os valores obtidos no modelo SEBAL e os obtidos a partir das medidas das torres micrometeorológicas do projeto Sulflux.

Tabela 11 – Diferenças entre os valores calculados e observados de evapotranspiração diária.

Área de estudo	Imagem	Data	SEBAL (mm)	Torre micrometeorológica (mm)	Diferença	
					mm	%
Arroz	Arroz 1	28-nov-14	6,70	7,58	0,88	12%
	Arroz 2	27-out-14	6,72	6,37	0,36	6%
	Arroz 3	09-set-14	2,44	4,52	2,08	46%
	Arroz 4	28-jan-14	7,44	6,89	0,55	8%
	Arroz 5	25-nov-13	7,60	6,59	1,01	15%
	Arroz 6	08-out-13	5,59	6,39	0,80	12%
	Arroz 7	01-set-11	2,30	2,11	0,19	9%
Soja	Soja 1	19-jan-2014	6,18	7,15	0,97	14%
	Soja 2	16-nov-2013	3,90	6,65	2,75	41%
	Soja 3	13-set-2013	2,19	2,98	0,79	26%
	Soja 4	22-abr-2013	1,46	1,15	0,32	28%
	Soja 5	09-fev-2010	5,82	8,54	2,72	32%
	Soja 6	21-jan-2009	4,47	7,29	2,83	39%
	Soja 7	05-jan-2009	3,94	6,03	2,09	35%
Campo	Campo 1	08-dez-15	6,07	5,10	0,97	19%
	Campo 2	22-nov-15	5,43	6,40	0,97	15%
	Campo 3	15-jun-15	1,03	4,80	3,77	79%
	Campo 4	05-dez-14	5,02	4,75	0,27	6%
	Campo 5	27-mai-14	2,35	0,94	1,41	150%
	Campo 6	24-mar-14	3,80	2,48	1,32	53%
	Campo 7	19-jan-14	5,80	3,94	1,86	47%

As imagens da área de estudo de arroz apresentaram resultados bastante satisfatórios, sendo considerada a área com a maior acurácia nos resultados obtidos de ET diária. Nesta área, a exceção está na imagem Arroz 3, que obteve um valor calculado pelo SEBAL 2,08 mm inferior a ET média diária observada em campo, resultando em um erro de 46%. As outras 6 imagens analisadas apresentaram diferença percentual do valor calculado em relação ao observado variando entre 8 e 15%.

Na área de soja, com exceção da imagem Soja 5, todas as outras imagens tiveram seus resultados calculados pelo SEBAL subestimados em relação aos observados em campo nas torres micrometeorológicas. A diferença entre os dados estimados e observados para esta área variou entre 0,32 e 2,83 mm/dia, com diferenças percentuais variando entre 14 e 41%.

Para a área de estudo de campo, as imagens Campo 1, Campo 2 e Campo 4 obtiveram bons resultados no SEBAL, quando comparados aos valores medidos em

campo, com diferenças percentuais de 19%, 15% e 6%, respectivamente. Para o restante das imagens desta área, obteve-se diferenças bastante elevadas, variando entre 47 e 150%. Salienta-se que a diferença obtida de 150% é para a imagem Campo 5, já analisada no item anterior, com potenciais erros operacionais na medição dos dados de fluxo de calor latente e, por consequência, de ET diária. Para o cálculo do RMSE para a área de campo, o resultado obtido nesta imagem será desconsiderado.

Na Figura 16, observa-se a dispersão dos valores de ET diária calculados pelo SEBAL em relação aos valores medidos em campo nas torres micrometeorológicas.

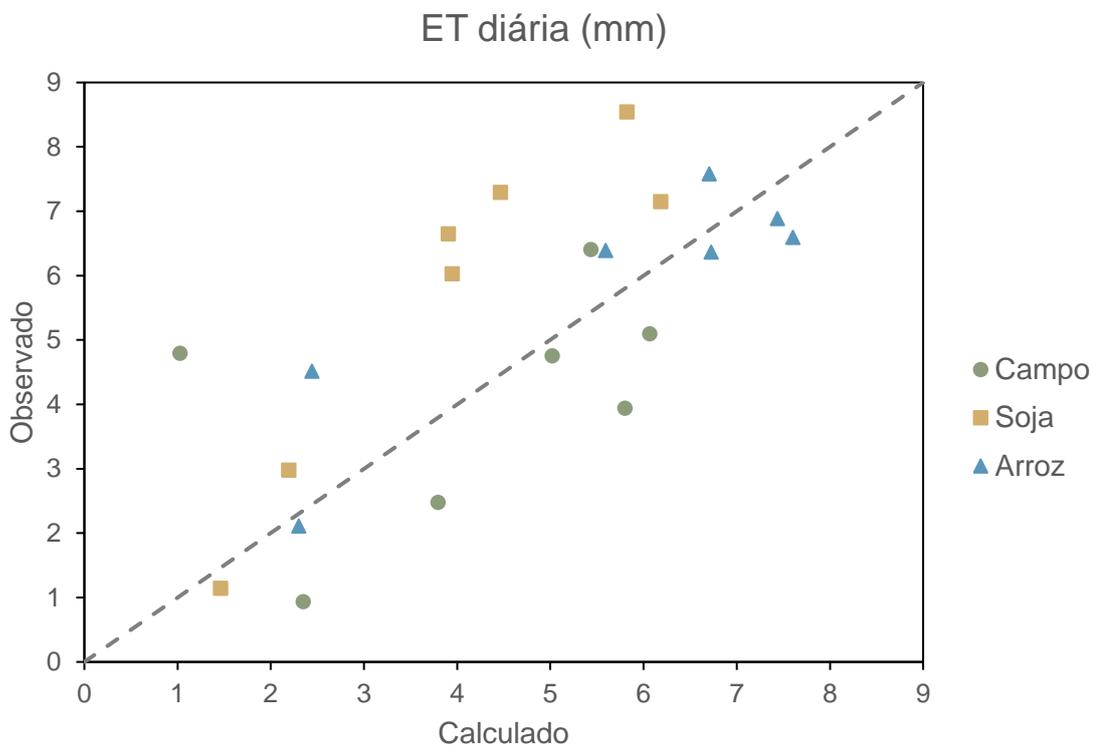


Figura 16 - Dispersão dos valores calculados em comparação aos valores observados para a ET diária.

A partir dos valores medidos e observados em cada área de estudo, calculou-se o RMSE, em mm e em porcentagem, conforme consta na Tabela 12, para verificação da acurácia do SEBAL na estimativa de ET diária.

Tabela 12 - RMSE, em mm e %, obtidos nas três áreas de estudo.

Área de estudo	ET diária	
	RMSE (mm)	RMSE (%)
Arroz irrigado	1,01	18%
Soja	2,03	36%
Campo	1,89	41%

A área de cultivo de arroz irrigado obteve os resultados mais acurados, com RMSE de 1,01 mm, comparado a 2,03 mm para a área de cultivo de soja não irrigado e 1,89 mm para a área de vegetação natural de campo.

### **5.2.2. Variabilidade temporal**

Os valores calculados pelo SEBAL nas áreas de estudo variaram, nas 7 imagens analisadas, entre:

- 2,30 e 7,60 mm/dia, para o cultivo de arroz irrigado;
- 1,46 e 6,18 mm/dia, para o cultivo de soja;
- 1,03 e 6,07 mm/dia, para a condição de vegetação natural do bioma pampa.

A área estudada de cultivo de arroz irrigado, no entorno da torre micrometeorológica CAC, apresentou as maiores taxas de ET diárias, sobretudo durante o período de desenvolvimento do arroz, quando comparadas às taxas de ET verificadas em cultivos agrícolas não-irrigados e vegetação natural. Apesar das altas taxas de ET em áreas irrigadas, verificou-se que culturas agrícolas não-irrigadas e áreas de vegetação natural também apresentam grande demanda hídrica durante os meses de verão, evidenciado por exemplo a suscetibilidade de culturas de sequeiro a variabilidade climática.

No gráfico da Figura 17 foram plotados os valores de ET diária, em mm, calculados pelo SEBAL no pixel da torre micrometeorológica, para as três áreas estudadas, em função dos meses do ano.

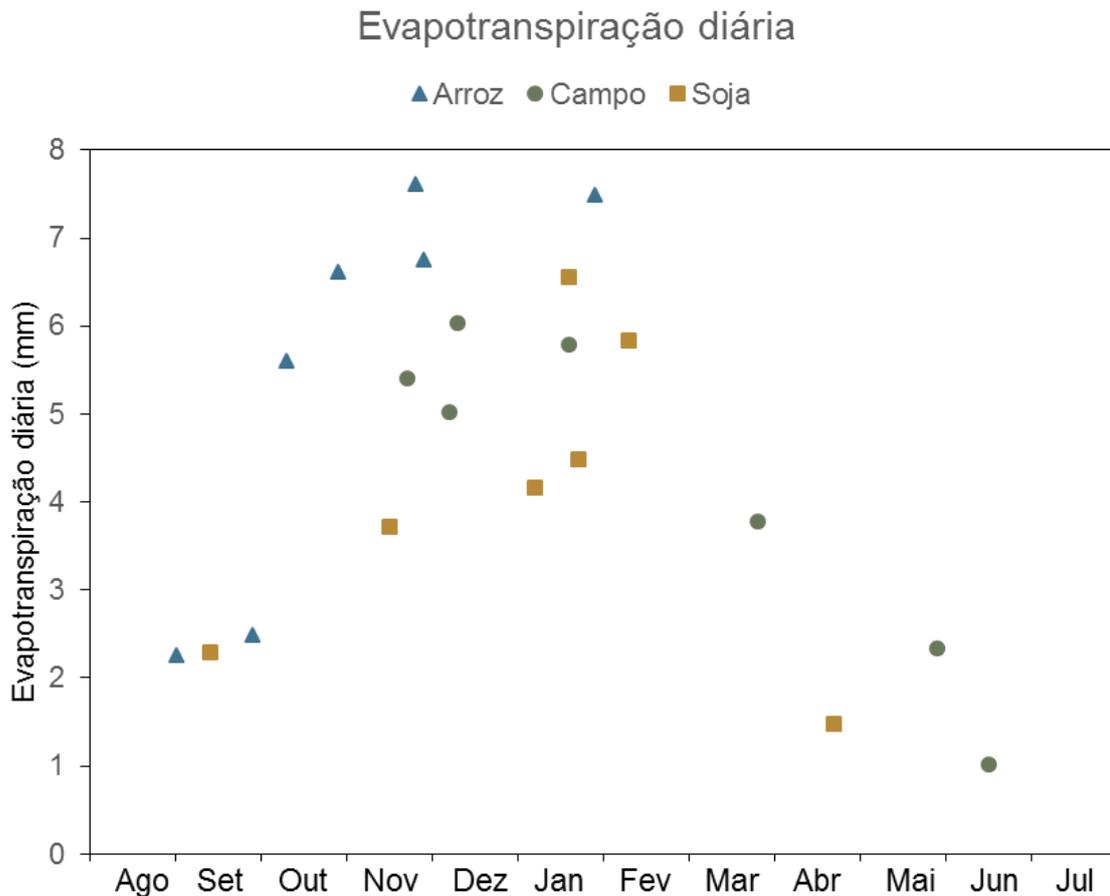


Figura 17 - ET diária das imagens estudadas.

A partir dos gráficos, verifica-se a variabilidade temporal na quantidade de água evapotranspirada, de acordo com a estação do ano, para as três diferentes coberturas do solo. As maiores taxas de ET são observadas em novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Nestes meses, no Rio Grande do Sul, há maior radiação solar e maiores temperaturas de superfície, e coincide com o período de desenvolvimento das culturas estudadas, que são culturas de verão.

A imagem Arroz 6, da primeira quinzena de outubro, época em que normalmente recém ocorreu o plantio do arroz e a área encontra-se alagada, teve uma ET diária de 5,61 mm, e a imagem Arroz 2, do final de outubro, teve ET diária de 6,72 mm. Estes valores são superiores aos valores calculados nas imagens de satélite Arroz 3 e Arroz 7, ambas do início de setembro - período em que ainda não se iniciou a semeadura do arroz e o solo encontra-se normalmente exposto -, que apresentaram taxas médias de ET diária de 2,44 e de 2,30 mm, respectivamente.

As imagens Arroz 1, Arroz 4 e Arroz 5 foram capturadas pelo satélite LANDSAT entre o final de novembro e janeiro, datas que o arroz se encontra em fase de

crescimento. As demandas hídricas médias do arroz, calculadas pelo SEBAL para estas datas, foram de 6,70, 7,44 e 7,60 mm por dia.

Para os meses de dezembro e de fevereiro a agosto, não se obteve imagens LANDSAT que atendessem aos critérios de seleção de imagens para a área de arroz irrigado.

Quanto a fase de desenvolvimento da soja, que ocorre no período das imagens de satélite Soja 1, Soja 5, Soja 6 e Soja 7, entre os meses de janeiro e fevereiro, verificou-se valores bastante variados de ET, entre 3,94 e 6,18 mm/dia.

As menores taxas médias de ET diária na área de cultivo de soja foram observadas nas imagens Soja 3, da primeira quinzena de setembro, e Soja 4, da segunda quinzena de abril, com valores de 2,19 e 1,46 mm. Normalmente, estas são datas em que o solo se encontra exposto, sem plantação de soja.

A variabilidade temporal das taxas de ET na área de campo não depende do ciclo de cultivo da planta, como para as áreas de arroz irrigado e de soja. Neste caso, a variação ocorre predominantemente devido a fatores climáticos, de radiação e de temperatura.

Os menores valores são observados nos meses de maio e junho, nas imagens Campo 3 e Campo 5. As taxas de ET obtidas para estas duas imagens foram de 1,03 e 2,35 mm/dia, respectivamente. A imagem Campo 6, de 24 de março, final do verão, obteve demanda média de 3,80 mm/dia.

O restante das imagens da área de campo - de novembro, dezembro e janeiro - apresentou demanda média variando de 5,02 a 6,07 mm/dia.

### **5.2.3. Variabilidade espacial**

Como saída da rotina do SEBAL em Matlab, obtém-se uma imagem que mostra a taxa de ET diária em cada pixel da imagem de satélite, permitindo a visualização da variabilidade espacial da ET diária na área de estudo. No total, foram geradas 21 imagens de saída do modelo, sendo uma para cada uma das 7 imagens analisadas, das 3 áreas de estudo.

Para cada área de estudo, selecionou-se uma imagem do mês de janeiro, para apresentar a variabilidade espacial da ET diária. As imagens da variabilidade da ET diária foram classificadas de acordo com seus percentis, e não em intervalos iguais, para melhor visualização. Ao lado da imagem obtida no SEBAL, foi inserida a imagem LANDSAT em coloração natural da data analisada, obtida em USGS (2018), com a

finalidade de melhor compreender a variabilidade nas taxas de ET de acordo com as condições de uso e cobertura da terra.

A Figura 18 apresenta o arquivo de saída da imagem Arroz 4, capturada na data de 28 de janeiro de 2014, que engloba, além da área de cultivo de arroz, outras condições de cobertura do solo. No detalhe da Figura 18, é apresentada a área do entorno da torre CAC, caracterizada quase totalmente por plantações de arroz.

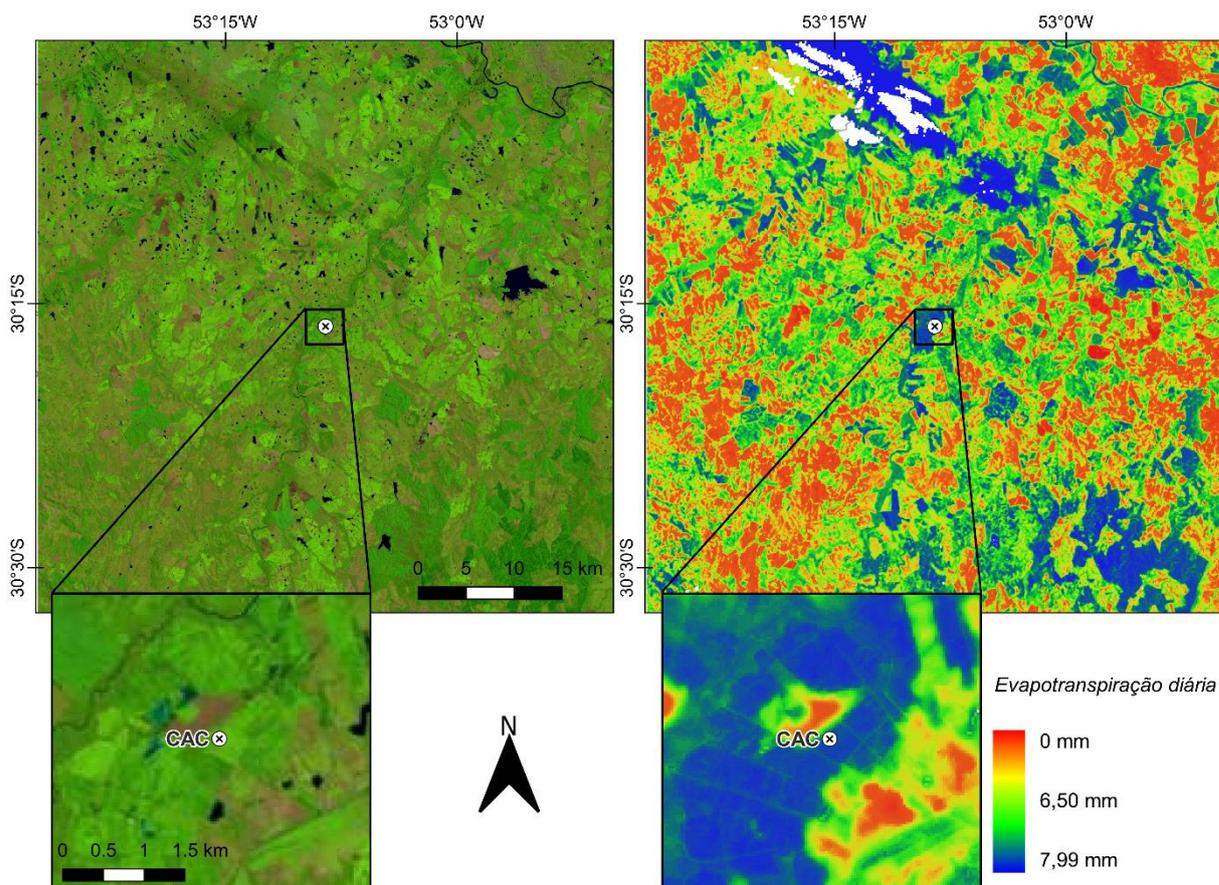


Figura 18 - Variabilidade espacial da ET diária, na área de estudo de cultivo de arroz irrigado, para o dia 28/01/2014.

Verifica-se que, na área total simulada, há valores de ET diária variando de 0 a 7,99 mm, sendo 50% dos pixels da imagem com valores superiores a ET diária de 6,50 mm. No detalhe, também se observa variação espacial da ET, mas há um predomínio de taxas mais elevadas de ET, o que é esperado para a época de aquisição da imagem de satélite. Em janeiro, o arroz irrigado já foi semeado e apresenta-se em época de crescimento da planta.

A Figura 19 apresenta a imagem de saída obtida nos cálculos realizados na rotina SEBAL em Matlab para a imagem de satélite Soja 1, de 19 de janeiro de 2014.

No detalhe da Figura 19, deu-se ênfase para a área do entorno da torre micrometeorológica CRZ, situada em uma plantação de soja.

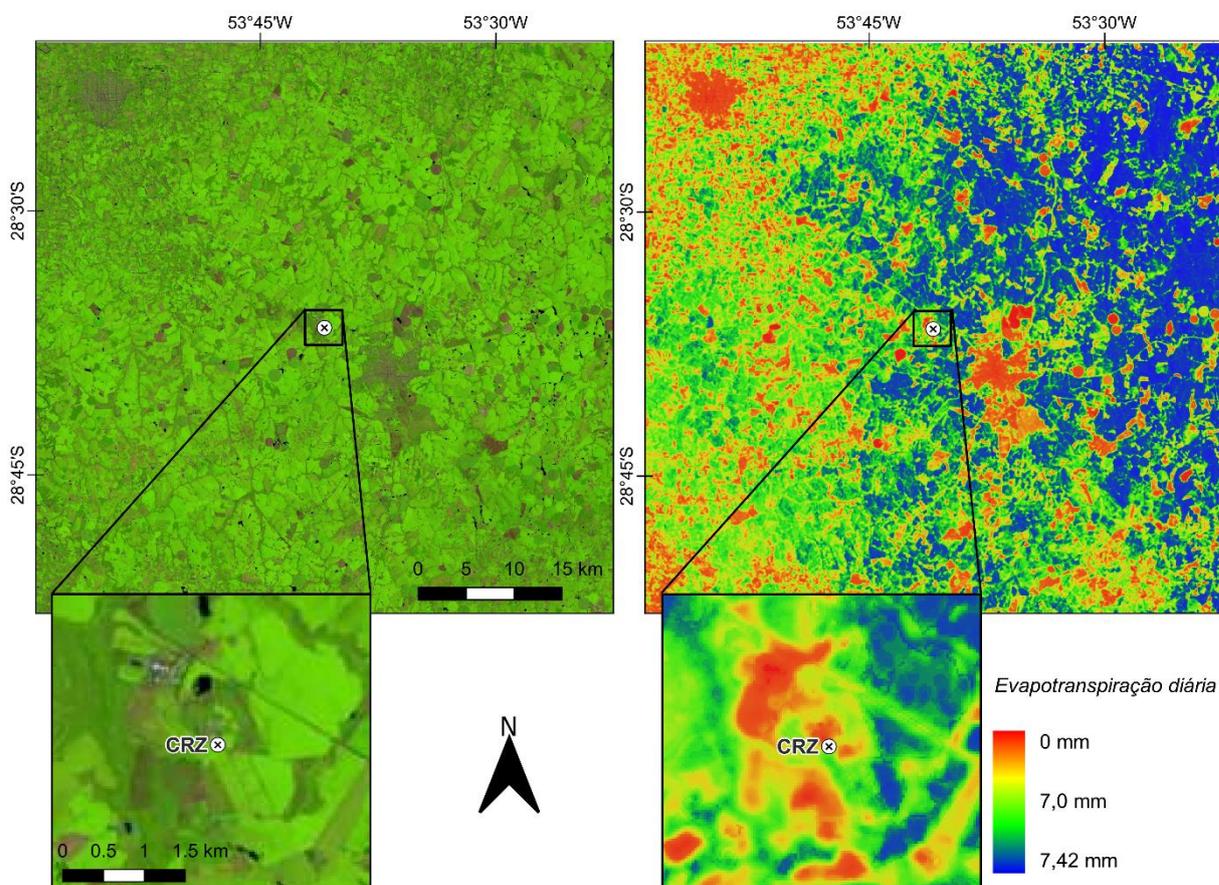


Figura 19 - Variabilidade espacial da ET diária, na área de estudo de cultivo de soja, para o dia 19/01/2014.

Na análise da imagem inteira da área estudada, observa-se um intervalo de ET diária variando de 0 a 7,42 mm, com maior concentração de pixels (50%) apresentando ET diária entre 7,0 e 7,42 mm, conforme mostra a escala de cores utilizada. Salienta-se a presença de dois centros urbanos na imagem, dos municípios de Cruz Alta no centro e de Ijuí a noroeste, onde as taxas de ET são bastante baixas, predominando colorações avermelhadas.

No detalhe, verifica-se que as taxas de ET nesta época do ano são elevadas. As áreas em vermelho no detalhe, de baixa ET, ocorrem devido a existência de construções no entorno da plantação de soja.

Para apresentar a variabilidade espacial da ET diária na área de estudo de campo, selecionou-se a imagem Campo 7, de 19 de janeiro de 2014, conforme mostra a Figura 20.

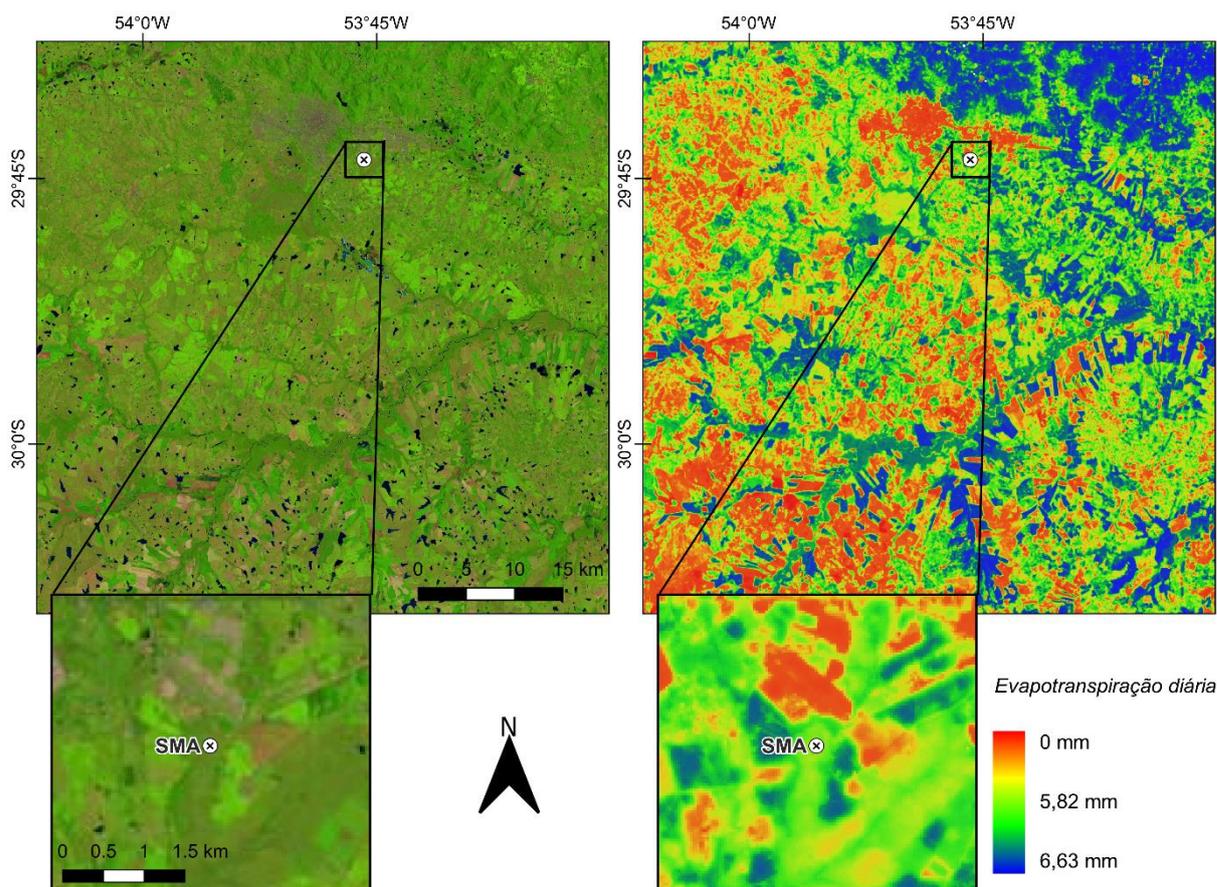


Figura 20 - Variabilidade espacial da ET diária, na área de estudo de campo, para o dia 19/01/2014.

As taxas de ET diária, na área total da imagem Campo 7, variaram de 0 a 6,63 mm, com maior concentração de pixels entre 5,82 e 6,63 mm/dia. Nesta imagem, observa-se baixas taxas de ET nos locais onde, na imagem de coloração natural, verifica-se menores índices de vegetação e exposição de solo.

### 5.3. DISCUSSÃO

Considerando as validações do algoritmo SEBAL revisadas por Bastiaanssen et al. (2005), os resultados obtidos de ET diária na área de arroz irrigado foram considerados satisfatórios, com acurácia de +/- 15% na estimativa de ET em escalas diárias. As áreas de estudo de cultivo de soja e de condição natural de vegetação do bioma pampa apresentaram menor acurácia nos resultados validados de ET diária.

As porcentagens utilizadas na seleção dos pixels âncora das imagens propostas por Kich (2018) foram obtidas em análise de área de cultivo de arroz irrigado, o que justifica a melhor acurácia encontrada nesta cobertura do solo neste estudo. Os resultados do trabalho comprovam a sensibilidade do SEBAL, já observadas por Wang, Sammis e Gutschick (2009) e por Kich (2018), em relação à

escolha dos pixels âncora, mostrando a necessidade de refinar a análise e seleção dos pixels frio e quente de acordo com a cobertura do solo que é objeto de estudo.

Embora os resultados obtidos na rotina SEBAL tenham apresentado acurácia e precisão bastante variados, quando validados com os dados medidos em campo pelas torres micrometeorológicas do projeto Sulflux, observa-se consistência nos valores obtidos, de acordo com as condições climáticas do estado e as características das plantas estudadas. Os dados medidos em campo pelo método de covariância de vórtices turbulentos apresentam falhas operacionais, além de problemas no balanço energético (LIU; XU, 2017), que não foram corrigidos neste trabalho.

Souza et al. (2018) avaliaram o balanço energético dos valores de fluxos medidos na torre micrometeorológica CAC e obtiveram coeficientes de correlação de 0,91 na época de pousio do cultivo e de 0,93 na época de cultivo do arroz irrigado, comprovando o desbalanceamento energético esperado em medições pelo método de vórtices turbulentos. O desbalanceamento energético justifica os resultados superestimados de fluxo de calor latente obtidos na área de arroz irrigado.

A área de campo do bioma pampa situada em Santa Maria, no entorno da torre SMA, foi analisada entre setembro de 2014 e setembro de 2016 por Rubert (2017), período que compreende 4 das 7 imagens da área de campo estudada. A estimativa da ET para a área foi realizada através do método de covariância de vórtices turbulentos, com correção do balanço energético. Rubert (2017) relata que os dados medidos pela torre apresentaram valores de fluxo subestimados em 25% em relação a disponibilidade total de energia. Rubert (2017) estima que a ET no bioma Pampa varia entre 0 e 7,1 mm/dia no ano, apresentando menores valores nas estações de outono-inverno e maiores na primavera-verão. Os dados calculados com o modelo SEBAL, no pixel da torre SMA, variaram entre 1,03 mm/dia no inverno e 6,07 mm/dia no verão.

Salienta-se que a indisponibilidade de imagens LANDSAT no período estudado que atendem ao critério de céu limpo de nuvens impossibilita a estimativa da demanda hídrica total dos cultivos agrícolas ao longo do seu ciclo. Para esta análise, faz-se necessário a análise de diferentes imagens de satélite, ao longo de todos os meses do ano. Calcula-se a demanda hídrica total do cultivo somando a demanda hídrica em cada mês, durante o crescimento da planta, desde a sua semeadura até a sua colheita. Para o arroz, obteve-se estimativa da demanda hídrica diária somente para os meses de setembro, outubro, novembro e janeiro, e para a soja, para novembro,

janeiro e fevereiro. A limitação devido a resolução temporal dos satélites LANDSAT para a estimativa de ET sazonal já foi apontada por outros autores (ANDERSON et al., 2012; FISHER et al., 2017). Anderson et al. (2012) relatam a importância da existência simultânea de satélites da missão LANDSAT, visando mitigar os efeitos de imagens com cobertura de nuvens, sobretudo em áreas mais úmidas. Essas limitações relacionadas a disponibilidade de imagens LANDSAT pode ser superada através do uso e fusão com imagens de outros sensores, como dos sensores LANDSAT-MODIS-GOES (ANDERSON et al., 2011).

## 6. CONCLUSÃO

A análise de taxas de ET através de sensoriamento remoto é um grande avanço para o monitoramento de grandes áreas. Os resultados gerados a partir de imagens de satélite com o algoritmo SEBAL permitem visualizar a variabilidade espacial e identificar taxas de ET em diferentes tipos de cobertura do solo.

Quanto a variabilidade temporal, a análise por sensoriamento remoto fica restrita a disponibilidade de imagens de satélite livres da interferência de nuvens, assim como ao período de revisita dos sistemas sensores utilizados. Para as missões LANDSAT, com período de revisita de 16 dias, o monitoramento não pode ser feito em períodos inferiores a este.

A aplicação do modelo SEBAL apresentou variação na acurácia para as diferentes condições de cobertura do solo e para os diferentes parâmetros validados com dados medidos por torres micrometeorológicas. Os resultados mais acurados foram observados na área de cultivo de arroz irrigado e, quanto as componentes do balanço energético, os menores erros foram obtidos para o saldo instantâneo de radiação líquida. Apesar disso, os valores calculados pelo SEBAL apresentaram consistência com as estações climáticas do Rio Grande do Sul e com a fase de desenvolvimento dos cultivos de soja e de arroz, sendo, portanto, satisfatórios para entendimento da demanda hídrica das culturas agrícolas.

O cultivo de arroz irrigado, no Rio Grande do Sul, demanda as maiores quantidades de água para o seu desenvolvimento, com as maiores taxas de ET identificadas em comparação as outras duas condições de cobertura do solo estudadas, de cultivo de soja e de vegetação natural do bioma pampa. O elevado consumo observado para o arroz justifica a grande demanda de água para irrigação pelo setor da agricultura.

Ainda que tenham apresentado taxas de ET inferiores, as outras duas áreas estudadas também apresentaram altas demandas hídricas, sobretudo na estação de verão. As estimativas de demandas hídricas destas coberturas do solo, em condições naturais e não irrigadas, ainda que não representem uso da água direto pelo setor da agricultura, são bastante relevantes para estudo do balanço hídrico e gestão de recursos hídricos da região.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). ATLAS IRRIGAÇÃO: Uso da Água na Agricultura Irrigada. Brasília: ANA, 2017a.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2017 – Relatório Pleno. Brasília: ANA, 2017b.
- ALLEN, R. G. et al. Automated Calibration of the METRIC-Landsat Evapotranspiration Process. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*. v. 49, n. 3, p. 563-576. 2013.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 290 p.
- ALLEN, R. G. et al. Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL). Advanced Training and Users Manual. Idaho, 2002. 98p.
- ALLEN, R. G.; MORSE, A.; TASUMI, M. Application of SEBAL for Western US Water Rights Regulation and Planning. ICID WORKSHOP ON REMOTE SENSING OF ET FOR LARGE REGIONS, 2003.
- ANDERSON, M. C. et al. Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery. *Hydrology And Earth System Sciences*, [s.l.], v. 15, n. 1, p.223-239, 21 jan. 2011. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-223-2011>.
- ANDERSON, M. C. et al. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing Of Environment*, [s.l.], v. 122, p.50-65, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>.
- AUBINET, Marc; VESALA, Timo; PAPALE, Dario (Ed.). Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Springer, 2012.
- BASTIAANSEN, W. G. M. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, [s.l.], v. 212-213, p.198-212, dez. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(98\)00253-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(98)00253-4).
- BASTIAANSEN, W. G. M. et al. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, [s.l.], v. 131, n. 1, p.85-93, fev. 2005. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2005\)131:1\(85\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2005)131:1(85)).
- BIGGS et al. Remote Sensing of Evapotranspiration from Cropland. 2015.
- BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos,

regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 8 jan. 1997.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos - V. 5 - SAFRA 2017/18 - N. 12 - Décimo segundo levantamento. Brasília: CONAB, 2018.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. 2007. Ecofisiologia da soja. Londrina: Embrapa Soja, 2007.

FEIX, R. D.; LEUSIN JÚNIOR, S.; AGRANONIK, C. Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul — 2017. Porto Alegre: FEE, 2017.

FISHER, J. B. et al. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resources Research*, [s.l.], v. 53, n. 4, p.2618-2626, abr. 2017. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2016wr020175>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). AQUASTAT. 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>>. Acesso em: 03 set. 2018.

GARCIA, A. Época de semeadura. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/soja/arvore/CONT000fv6nbpq002wx5eo0c9slrah3apwqs.html>>. Acesso em: 24 set. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário: resultados preliminares. Brasil: 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 05 out. 2018.

KICH, E. M. Calibração automática do modelo de estimativa de evapotranspiração por sensoriamento remoto (SEBAL). 103 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

LI, Zhao-liang et al. A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, [s.l.], v. 9, n. 5, p.3801-3853, 19 maio 2009. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s90503801>.

LIU, Y.; KAR, S. Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms—A Review. *Energies*, [s.l.], v. 7, n. 5, p.2821-2849, 28 abr. 2014. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en7052821>.

- LIU, S.; XU, Z. Micrometeorological Methods to Determine Evapotranspiration. Observation And Measurement, [s.l.], p.1-39, 4 dez. 2017. Springer Berlin Heidelberg. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47871-4\\_7-2](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47871-4_7-2).
- MELESSE, A. M. et al. Analysis of energy fluxes and land surface parameters in a grassland ecosystem: a remote sensing perspective. International Journal of Remote Sensing, [s.l.], v. 29, n. 11, p.3325-3341, 19 maio 2008. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160701442153>.
- Montgomery; R. B. Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. 1948.
- NASA. Water Watchers. 2010. Elaborado por Holli Riebeek. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/features/WaterWatchers>>. Acesso em: 04 dez. 2018.
- Obukhov; A. M. Charakteristiki mikrostruktury vetra v prizemnom sloje atmosfery (Characteristics of the microstructure of the wind in the surface layer of the atmosphere). 1951.
- RUBERT, G. C. D. Variabilidade sazonal e controle biofísico da evapotranspiração na vegetação do bioma pampa. 2017. 97 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- SCHIRMBECK, J.; FONTANA, D. C.; ROBERTI, D. R. Evaluation of OSEB and SEBAL models for energy balance of a crop area in a humid subtropical climate. Bragantia, [s.l.], 1 nov. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.2017208>.
- SCIVITTAR, W. B.; PETRINI, J. A.; GOMES, A. S. Irrigação e drenagem. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fojvokod02wyiv80bhgp5p9cxb3rg.html>>. Acesso em: 11 nov. 2018.
- SOUZA, V. A. et al. Evaluation of MOD16 algorithm over irrigated rice paddy using flux tower measurements in Southern Brazil. 2018.
- STEINMETZ, S.; BRAGA, H. J. Zoneamento de arroz irrigado por épocas de semeadura nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p.429-438, dez. 2001.
- STONE, L. F. Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 48 p.
- SWINBANK, W. C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. Journal of Meteorology, v. 8, n. 3, p.135-145, jun. 1951.
- TEIXEIRA, A.h. de C. et al. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River

basin, Brazil. *Agricultural And Forest Meteorology*, [s.l.], v. 149, n. 3-4, p.462-476, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.016>

TWINE, T. E. et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural And Forest Meteorology*, [s.l.], v. 103, n. 3, p.279-300, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1923\(00\)00123-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1923(00)00123-4).

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat—Earth observation satellites. Fact Sheet, [s.l.], 2015. US Geological Survey. <http://dx.doi.org/10.3133/fs20153081>.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). LSDS Science Research and Development (LSRD). Disponível em: <<https://espa.cr.usgs.gov/>>. Acesso em: 23 set. 2018.

WANG, J.; SAMMIS, T. W.; GUTSCHICK, V. P. Sensitivity Analysis of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). *Transactions of The Asabe*, [s.l.], v. 52, n. 3, p.801-811, 2009. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.27401>.

## APÊNDICE A - DADOS DE ENTRADA SEBAL

Tabela 13 - Dados de entrada da área de estudo de cultivo de soja, para cálculo no SEBAL.

ID imagem	Temperatura (°C)	Vento (m/s)	Umidade (%)	Altitude (m)	Altura Vegetação (m)	Altura Estação (m)	Rn diária (W/m <sup>2</sup> )
LC08_L1TP_223080_20140119_20170426_01_T1	26,6	1	90	472,5	0,4	10	209,9516479
LC08_L1TP_223080_20131116_20170428_01_T1	18	3	82	472,5	0,15	10	202,4819619
LC08_L1TP_223080_20130913_20170502_01_T1	23	3	80	472,5	0,05	10	87,69713333
LT05_L1TP_223080_20101226_20161011_01_T1	25	3	65	472,5	0,2	10	200,4244935
LC08_L1TP_223080_20130422_20170505_01_T1	16	2	91	472,5	1,2	10	73,000746
LT05_L1TP_223080_20090121_20161028_01_T1	18,2	3	84	472,5	0,4	10	180,3867798
LT05_L1TP_223080_20090105_20161028_01_T1	18,8	3	79	472,5	0,4	10	191,147974

Tabela 14 - Dados de entrada da área de estudo de cultivo de arroz irrigado, para cálculo no SEBAL.

ID imagem	Temperatura (°C)	Vento (m/s)	Umidade (%)	Altitude (m)	Altura Vegetação (m)	Altura Estação (m)	Rn diária (W/m <sup>2</sup> )
LC08_L1TP_222081_20141128_20170417_01_T1	22,6	3,08664	75	95	0,4	10	224,4409032
LC08_L1TP_222081_20141027_20170418_01_T1	23,8	1,54332	80	95	0,1	10	211,2503328
LC08_L1TP_222081_20140909_20170419_01_T1	27	5,1444	55	95	0,05	10	129,357854
LC08_L1TP_222081_20140128_20170426_01_T1	31,6	3	65	95	1,1	10	227,1116397
LC08_L1TP_222081_20131125_20170428_01_T1	27	1,6	63	95	0,4	10	233,8007807
LC08_L1TP_222081_20131008_20170429_01_T1	17,4	2,6	72	95	0,1	10	177,6554943
LT05_L1TP_222081_20110901_20161006_01_T1	9	1	86	95	0,05	10	91,29803542

Tabela 15 - Dados de entrada da área de estudo de campo, para cálculo no SEBAL.

ID imagem	Temperatura (°C)	Vento (m/s)	Umidade (%)	Altitude (m)	Altura Vegetação (m)	Altura Estação (m)	Rn diária (W/m²)
LC08_L1TP_223081_20151208_20170401_01_T1	21,6	2,8	72	95	0,30	10	231,4768685
LC08_L1TP_223081_20151122_20170401_01_T1	20,4	1,6	75	95	0,30	10	223,6625317
LC08_L1TP_223081_20150615_20170407_01_T1	9,8	0,8	69	95	0,30	10	50,86418333
LC08_L1TP_223081_20141205_20170416_01_T1	23	3,08664	70	95	0,30	10	222,4020083
LC08_L1TP_223081_20140527_20170422_01_T1	8	0,5	100	95	0,30	10	89,965675
LC08_L1TP_223081_20140324_20170424_01_T1	14	0,8	98	95	0,30	10	166,005391
LC08_L1TP_223081_20140119_20170426_01_T1	30,6	0,5	68	95	0,30	10	187,3829292