

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

VANESSA DE ARRUDA SOUZA

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA
A ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UMA CULTURA DE
ARROZ IRRIGADO**

Porto Alegre, RS, Brasil.
2013

VANESSA DE ARRUDA SOUZA
METEOROLOGISTA

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA
A ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UMA CULTURA DE
ARROZ IRRIGADO**

Dissertação apresentada como um dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto, área de concentração em Sensoriamento Remoto aplicado a Meteorologia.

Orientadora: Prof^a. Dra Rita de Cássia Marques Alves

Co-orientadora: Dra Débora Regina Roberti (UFSM)

Porto Alegre, RS, Brasil.
2013

À minha família em especial aos meus pais, que são exemplos em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por tudo que estudei e conquistei na minha vida.

Um agradecimento especial ao meu pai, mesmo não estando mais presente entre nós, sempre me ajudou e me apoiou nos estudos, assim como minha mãe que continua me dando forças para seguir em frente, mesmo que esteja longe, está sempre próxima de coração.

Aos meus avós e meus irmãos Leonardo e Alfeu por toda a compreensão, força e incentivo aos meus estudos.

À todos meus amigos em especial a Fernanda Souza, Marcelo Moraes e Karine Garcia por toda força, ajuda, e energias positivas para conclusão do meu trabalho.

À minha orientadora Dra. Rita de Cássia Marques Alves, pela grande amizade, conselhos, ajudas, compreensão nas horas difíceis, e por todo o incentivo para conquistar este título.

À minha co-orientadora Dra Débora Regina Roberti, pelas dicas de pesquisa, ajudas, conselhos, e pela nossa amizade que vem desde a minha graduação.

Aos meus professores pelo ensinamento transmitido e aos auxílios.

Aos meus colegas de aula, por sempre me ajudarem e me animarem nos momentos difíceis.

Aos meus colegas de laboratório por todo o apoio, ajuda, conselhos e pelo companheirismo diariamente.

À banca composta pela Dra Denise Fontana, Dr Gervásio Degrazia e em especial Dra Eliana Klering, por todos os conselhos transmitidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e FINEP pelo suporte financeiro.

Ao programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul por viabilizar a realização deste trabalho.

Enfim, muito obrigada de coração a todos que me apoiaram e acreditaram em mim e na minha força de vontade.

*“Por mais longe que seja a caminhada
o mais importante é dar o primeiro
passo.”*

Vinícius de Moraes

RESUMO

A evapotranspiração (ET) é um fenômeno natural que influencia diretamente mudanças no clima local e global, possuindo grande importância hidrológica e meteorológica. Este trabalho teve como objetivo estimar a ET através do método Penman-Monteith, e comparar com os resultados estimados pelo Método da Covariância de Vórtices Turbulentos. Os dados de IAF (Índice de Área Foliar) para descrição da vegetação foram obtidos a partir do sensor MODIS e de medições em campo da Rede SulFlux. A área de estudo desta pesquisa localizou-se no município de Cachoeira do Sul-RS, em uma propriedade de cultivo de arroz irrigado. O período de estudo referiu-se a safra que estendeu-se de outubro de 2010 a março de 2011. Os resultados mostraram que o IAF e as estimativas de ET apresentam um comportamento temporal semelhante. A comparação entre os resultados das estimativas de ET, utilizando dados obtidos em campo e estimados através de sensoriamento remoto, foram satisfatórios. No entanto, o resultado que apresentou os maiores valores para a ET foi proveniente do sensor MODIS. Sendo assim, pode-se concluir que a estimativa da ET, a partir de dados de vegetação, obtidos através de técnicas de sensoriamento remoto, constituem-se como uma alternativa para os métodos de ET que utilizam dados de vegetação medidos em campo.

Pavavras-chave: Evapotranspiração, Índice de área foliar, MODIS.

ABSTRACT

The Evapotranspiration (ET) is a natural phenomenon that directly causes changes in the local and global climate, having a great hydrologic and meteorological importance. This work has as objective to estimate ET through the Penman-Monteith method and compare with the estimated results by the Eddy Covariance Method. The LAI (Leaf Area Index) data for the vegetation description were obtained from the MODIS sensor and from field measurements of the SulFlux network. The field of study of this research had place in the city of Cachoeira do Sul – Rio Grande do Sul state, in a irrigated rice crop property. The study period is referred to the crop that extended from October 2010 to March 2011. The results showed that the LAI and the ET estimates have a similar temporal behavior. The comparison between the results of ET estimates, using data obtained in field and estimated through remote sensing, were satisfactory. However, the result that showed the highest values for ET was from the MODIS sensor. This way, it can be concluded that the ET estimate, through vegetation data, obtained by remote sensing techniques, are an alternative for the ET methods that use vegetation field measured data.

Keywords: Evapotranspiration, Leaf Area Index, MODIS.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AIRS** - Atmospheric Infrared Sounder
- AMSR-E** - Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System
- AMSU-A** - Advanced Microwave Sounding Unit-A
- ASTER** - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
- AVHRR** – Advanced Very High Resolution Radiometer
- BOC** – Balanço de Ondas Curtas
- BOL** – Balanço de ondas longas
- CE** - Ceará
- CERES** - Clouds and the Earth's Radiant Energy System
- EOS** – Earth Observing System
- ET** – Evapotranspiração
- ETc** – Evapotranspiração de Cultura
- ETO** – Evapotranspiração de Oásis
- ETP** – Evapotranspiração Potencial
- ETr** – Evapotranspiração Real
- ETo** – Evapotranspiração de Referência
- FAO** – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação
- FPAR** - Fraction of Photosynthetically Active Radiation
- FURG** – Universidade Federal do Rio Grande
- GrADS** – Grid Analysis and Display System
- HDF** – Hierarchical Data Format
- HSB** - Humidity Sounder for Brazil
- IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IAF** – Índice de Área Foliar
- INMET** – Instituto Nacional de Meteorologia
- IVM**- Infravermelho médio
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IRGA** – Instituto Rio Grandense do Arroz
- IVP** – Infravermelho próximo

LAI - Leaf Area Index
LμMet – Laboratório de Micrometeorologia
LUT – Look-Up-Table
MISR - Multi-angle Imaging Spectro Radiometer
MODIS - Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
MOPITT - Measurement of Pollution in the Troposphere
NASA – National Aeronautics and Space Administration
OMM – Organização Meteorológica Mundial
PM – Penman-Monteith
REM – Radiação Eletromagnética
RJ – Rio de Janeiro
RS- Rio Grande do Sul
SALDAS – South American Land Data Assimilation System
SulFlux – Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas
UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense
UFPR – Universidade Federal do Paraná
UFSM – Universidade Federal de Santa Maria
UFV – Universidade Federal de Viçosa
VIS –Visível

LISTA DE SÍMBOLOS

λ - calor latente de vaporização (MJ.kg⁻¹)

T - temperatura

e_a - pressão atual de vapor ou pressão parcial de vapor [kPa]

e_s - pressão de vapor de saturação [kPa]

Δe - déficit de saturação

UR - umidade Relativa

Kc - coeficiente de Cultura

I - água fornecida (irrigação)

D - água percolada (Drenagem)

r_a - resistência aerodinâmica [s.m⁻¹]

r_s - resistência superficial [s.m⁻¹]

Δ - inclinação da curva de pressão de vapor [kPa.°C⁻¹]

R_n - saldo de radiação diário [W.m⁻²]

G - fluxo de calor no solo [W.m⁻²]

ρ_a - densidade média do ar a pressão constante [1,2 kg.m⁻³]

c_p - calor específico do ar a pressão constante [1.013 J.kg⁻¹°C⁻¹]

γ - constante Psicrométrica [kPa.°C⁻¹]

ρ_w - massa específica da água [1000 kg.m⁻³]

OC ↓ - radiação de onda curta incidente

OL ↓ - radiação de onda longa emitida pela atmosfera para a superfície

OC ↑ - radiação de onda curta refletida pela superfície

OL ↑ - radiação de onda longa emitida pela superfície

H - fluxo de Calor Sensível

λET - fluxo de Calor Latente

q - umidade específica do ar

P - pressão atmosférica [kPa]

ρ_a - densidade média do ar a pressão constante

ρ_{ar} - densidade do ar

ω' - flutuações da velocidade vertical do vento

T'' - expressa o desvio em relação à média da temperatura do ar em Kelvin

q' - desvio em relação à média da umidade específica do ar (kg.kg^{-1})

CO_2 - dióxido de Carbono

H_2O - água

z_m - altura da medida do vento [m]

z_h - altura da medida da umidade [m]

d - deslocamento do plano zero [m]

z_{0m} - comprimento de rugosidade da cultura para transporte de momento [m]

z_{0h} - comprimento de rugosidade para o transporte de vapor e calor sensível [m]

k - constante de Von Karman [0,41]

u_z - velocidade do vento na altura z [m.s^{-1}]

ac - altura da cultura [m]

u_2 - medida da velocidade do vento a 2 m de altura [m.s^{-1}]

u_z - medida da velocidade do vento na altura z [m.s^{-1}]

z - altura da medida do vento [m]

r_l - resistência estomática da folha [s.m^{-1}]

$\text{ET}_{\text{PM-MODIS}}$ - evapotranspiração estimada a partir de IAF-MODIS

SUMÁRIO

| | Página |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1 Conceitos básicos..... | 4 |
| 2.1.1 Evaporação..... | 4 |
| 2.1.1.1 Transpiração | 7 |
| 2.1.3 Evapotranspiração (ET) | 7 |
| 2.2 Métodos de estimativa de Evapotranspiração | 10 |
| 2.2.1 Aspectos gerais..... | 10 |
| 2.2.2 Método Penman-Monteith (PM) | 13 |
| 2.2.3 Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos..... | 16 |
| 2.3 Comportamento espectral da vegetação | 17 |
| 2.4 A cultura do arroz | 20 |
| 2.4.1 Aspectos relevantes | 20 |
| 2.4.2 Condições climáticas para a cultura de arroz..... | 23 |
| 2.4.3 Ciclo fenológico..... | 24 |
| 2.4.4 Evapotranspiração na cultura de arroz irrigado..... | 25 |
| 2.4.5 Comportamento espectral do arroz irrigado..... | 26 |
| 2.5 Sensor MODIS – Satélites TERRA e AQUA..... | 26 |
| 2.5.1 Produto MOD15: Índice de Área Foliar (IAF) e Fração de Radiação Fotossinteticamente Ativa (FPAR) | 29 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 31 |
| 3.1 Área de estudo | 31 |
| 3.2 Período de estudo | 33 |
| 3.3 Banco de dados..... | 33 |
| 3.3.1 Dados da Rede SulFlux | 33 |
| 3.3.2 Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet)..... | 35 |
| 3.3.3 Dados de Índice de Área Foliar (IAF)..... | 36 |
| 3.4 Descrição das análises | 37 |

| | |
|--|-----------|
| 4. RESULTADOS..... | 42 |
| 4.1 Condições Meteorológicas..... | 42 |
| 4.2 Sensoriamento Remoto e dados experimentais | 46 |
| 4.3 Comparação entre as estimativas de Evapotranspiração..... | 48 |
| 4.3.1 Comparação das estimativas $ET_{PM-MODIS}$ e ET_c com dados de IAF | 48 |
| 4.3.2 $ET_{PM-MODIS}$ x ET_c | 51 |
| 4.3.3 $ET_{PM-MODIS}$ x ET_r | 53 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 55 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 56 |
| 7. APÊNDICES | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | Página |
|--|--------|
| 1. Fases e etapas do crescimento da cultura de arroz. Fonte: Magalhães Jr. <i>et al.</i> , 2004. | 25 |
| 2. Especificações do espectrorradiômetro do MODIS para as Bandas 1 a 36. Fonte: Rudorff <i>et al.</i> , 2007. | 28 |
| 3. Descrição de valores de preenchimento da coleção 4 do MOD15A2. Fonte: Rudorff <i>et al.</i> , 2007. | 30 |
| 4. Normais climatológicas (1961-90) de temperatura (°C), umidade relativa (%) e velocidade do vento (m.s ⁻¹). Período: outubro a março. Fonte: INMet. | 44 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| 1. Gráfico psicrométrico que relaciona a pressão de vapor de saturação com a temperatura. Fonte: Pereira <i>et al.</i> (2000). | 6 |
| 2. Relação entre as fases de desenvolvimento fenológico e Kc para uma cultura anual. Fonte: Adaptado de Pereira <i>et al.</i> , (2000). | 9 |
| 3. Relação entre evapotranspiração relativa e crescimento da planta. Fonte: Adaptado de Allen <i>et al.</i> , (1998). | 10 |
| 4. Representação esquemática da variação diurna das componentes do balanço de energia acima de uma superfície bem irrigada transpirante em um dia de céu limpo. Fonte: adaptado de Allen <i>et al.</i> , (1998). | 15 |
| 5. Curva de reflectância de uma folha verde sadia. Fonte: Moreira, (2005). | 18 |
| 6. Mapa das regiões com cultura de arroz no Rio Grande do Sul. Fonte: Klering, (2012). | 21 |
| 7. Percentagem de área colhida nas regiões de cultura de arroz no Rio Grande do Sul. Fonte: IRGA, (2013)..... | 22 |
| 8. Produtividade da cultura de arroz para as diferentes áreas de cultivo no Rio Grande do Sul. Fonte: IRGA, (2013)..... | 22 |
| 9. Localização do município de Cachoeira do Sul - RS. | 31 |
| 10. Lavoura de arroz irrigado do sítio experimental (a); Visão geral da área de estudo (b) em Cachoeira do Sul - RS. | 32 |
| 11. Torre micrometeorológica do projeto Sulflux em Cachoeira do Sul - RS. | 34 |
| 12. Média diária do Saldo de Radiação ($W.m^{-2}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011. | 43 |
| 13. Temperatura média diária ($^{\circ}C$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011. | 43 |
| 14. Média diária da umidade relativa (%). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011. | 45 |
| 15. Média diária da velocidade do Vento ($m.s^{-1}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011. | 46 |

| | Página |
|--|--------|
| 16. Comportamento do Índice de Área Foliar ($m^2.m^{-2}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011. | 47 |
| 17. Variação da altura da cultura (m). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011. | 48 |
| 18. Comparação da evapotranspiração estimada pela $ET_{PM-MODIS}$ com dados de IAF-MODIS. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 201. ... | 49 |
| 19. Comparação da evapotranspiração estimada pela ET_c com dados de experimentais. Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011. .. | 50 |
| 20. Comportamento da estimativa de ET através da ET_{PM} e $ET_{PM-MODIS}$. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011. | 51 |
| 21. Gráfico de dispersão entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ET_{PM} . Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011. | 52 |
| 22. Ajuste linear entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ET_c . Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011..... | 52 |
| 23. Comportamento da estimativa de ET através da ET_{exp} e $ET_{PM-MODIS}$. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011. | 53 |
| 24. Gráfico de dispersão entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ET_{exp} . Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011. | 54 |
| 25. Ajuste linear entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ET_r . Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 54 |

LISTA DE APÊNDICES

| | Página |
|--|--------|
| APÊNDICE 1. Normais climatológicas (1961-1990) de temperatura (°C), umidade relativa (%) e velocidade do vento ($m.s^{-1}$). Período: outubro a março. Fonte: INMet..... | 63 |
| APÊNDICE 2. Média diária do Saldo de Radiação ($W.m^{-2}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 64 |
| APÊNDICE 3. Temperatura média diária (°C). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 64 |
| APÊNDICE 4. Média diária da umidade relativa (%). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 65 |
| APÊNDICE 5. Média diária da velocidade do Vento ($m.s^{-1}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 65 |
| APÊNDICE 6. Comportamento do Índice de Área Foliar ($m^2.m^{-2}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 66 |
| APÊNDICE 7. Variação da altura da cultura (m). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 66 |
| APÊNDICE 8. Comparação da evapotranspiração estimada pela $ET_{PM-MODIS}$ com dados de IAF-MODIS. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 67 |
| APÊNDICE 9. Comparação da evapotranspiração estimada pela ET_c com dados de IAF experimentais. Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011..... | 67 |
| APÊNDICE 10. Comportamento da estimativa de ET através da ET_c e $ET_{PM-MODIS}$. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 68 |
| APÊNDICE 11. Gráfico de dispersão entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ET_c . Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011..... | 68 |
| APÊNDICE 12. Ajuste linear entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ET_c . Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011..... | 69 |
| APÊNDICE 13. Comportamento da estimativa de ET através da ET_r e $ET_{PM-MODIS}$. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 69 |

| | Página |
|--|--------|
| APÊNDICE 14.. Gráfico de dispersão entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ETr . Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 70 |
| APÊNDICE 15. Ajuste linear entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ETr . Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011..... | 70 |

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas nas últimas décadas tornaram-se um dos principais temas de discussões no mundo. Pesquisadores têm estudado geleiras, dados históricos de clima, entre outros fatores, no qual, possibilitam prever e compreender tais mudanças. Atualmente, atividades humanas como: indústrias, agropecuária, desmatamento, automóveis, entre outros, vem contribuindo fortemente para as mudanças de Clima. As modificações ocasionadas por fenômenos naturais ou antrópicos favorecem flutuações em diversas componentes do ciclo hidrológico, tais como precipitação, evapotranspiração e umidade do solo, fundamentalmente dependentes dos processos de trocas radiativas e energéticos entre a atmosfera e a superfície (SANTOS, 2009).

A evapotranspiração (ET) é um fenômeno natural que influencia diretamente as mudanças no clima, tanto de forma local quanto global, referindo-se a passagem de água do estado líquido para o estado gasoso através da combinação de dois processos distintos, sendo estes: evaporação (solo úmido) e transpiração (plantas). A ET possui grande importância hidrológica e meteorológica, pois é componente principal do balanço hídrico e está diretamente relacionada à quantidade de vapor d'água no ar, podendo alterar a quantidade de chuva em determinadas regiões.

A estimativa da ET para um determinado local pode ser obtida através de métodos diretos ou indiretos. O método direto é obtido através de equipamentos de medida, sendo o lisímetro mais utilizado, porém devido ao alto custo, esta técnica se restringe a pesquisa. Os métodos indiretos, também conhecidos como métodos empírico-teóricos, utilizam dados atmosféricos em equações matemáticas para estimar a evapotranspiração. A obtenção de ET através destes métodos tem grande importância na modelagem de grande escala, sendo fundamental para previsão e estudo do clima.

Em culturas agrícolas a estimativa da ET máxima, também chamada de ET de cultura (ET_c), se baseia na ET de referência (ET_o) e no coeficiente da cultura (K_c). A ET_o é obtida considerando-se uma superfície vegetada (gramado), mantida

sobre condições ideais de crescimento, cobrindo totalmente o solo e sem restrição hídrica, podendo ser determinada por equações simples, baseadas somente na temperatura, ou por equações mais complexas, que envolvem o balanço de energia ao nível das plantas, como o método Penman-Monteith.

Embora não seja um método direto, a estimativa da evapotranspiração utilizando a técnica de covariância dos vórtices turbulentos tem sido amplamente utilizada para a estimativa da evapotranspiração real (ET_r), inclusive em áreas agrícolas (SUYKER; VERMA, 2009; SINGER *et al.*, 2010). Esta técnica permite a estimativa dos fluxos verticais de água e/ou energia através da covariância entre as flutuações da velocidade vertical do vento e do escalar respectivo.

Devido à grande quantidade de métodos existentes para a estimativa de ET a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) juntamente com a Comissão Internacional para Irrigação e Drenagem da Organização Meteorológica Mundial (OMM), organizou uma reunião, no ano de 1990, com especialistas em evapotranspiração, onde foi definido o método Penman-Monteith como padrão para estimativas da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos e de cobertura vegetal (ALLEN *et al.*, 1998).

Atualmente, o desenvolvimento do Sensoriamento Remoto permite realizar estudos diferenciados sobre diversas áreas do mundo. Através desta técnica é possível conhecer informações sobre o objeto sem contato físico entre o sensor e o alvo a ser estudado, devido à captação da energia proveniente do objeto e convertida em informações possíveis de análise e interpretação dos alvos. Assim, informações precisas sobre a cobertura do solo, obtidas através de satélites, podem acoplar-se às informações fornecidas a partir de estações meteorológicas para o cálculo proporcionando a estimativa de evapotranspiração para grandes áreas.

A utilização dos dados provenientes de sensores remotos, para a cobertura vegetal, é uma ferramenta importante para extensas áreas onde não podemos obter coletas de dados pontuais sobre a vegetação, sendo assim de fundamental importância para a descrição do comportamento da estimativa de ET.

Dentro deste contexto, o objetivo geral deste trabalho foi comparar a ET obtida pelo Método de Covariância de Vórtices turbulentos com a ET estimada através do método Penman-Monteith, em uma área cultivada com arroz irrigado. Os dados referentes à vegetação foram obtidos a partir do sensor orbital MODIS e os

dados atmosféricos e de ET experimental foram obtidos a partir da base de dados do sítio experimental, equipado com torre micrometeorológica, da Rede SulFlux (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas) localizado no município de Cachoeira do Sul - RS.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

1. Caracterizar as condições meteorológicas no sítio experimental de Cachoeira do Sul - RS;
2. Comparar os dados de IAF da cultura do arroz irrigado obtidos a partir de sensoriamento remoto com os dados coletados em campo;
3. Comparar a altura da cultura do arroz irrigado estimada a partir de dados orbitais com medições em campo;
4. Estimar ET, a partir do método Penman-Monteith, com dados da estação micrometeorológica e dados de satélites para a cultura de arroz irrigado do sítio experimental de Cachoeira do Sul - RS;
5. Comparar a evolução temporal do IAF da cultura do arroz irrigado com as estimativas de ET elaboradas a partir de diferentes métodos;
6. Comparar a ET estimada pelo método Penman-Monteith com a ET experimental obtida através do método de covariância dos vórtices;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos básicos

2.1.1 Evaporação

O termo evaporação é definido como o processo de transferência de água sob a forma de vapor para a atmosfera, decorrente tanto da evaporação que se verifica no solo úmido sem vegetação, nos oceanos, lagos, rios e em outras superfícies hídricas naturais, como da sublimação que se processa nas superfícies de gelo (geleiras, campos de neve, etc.) (VAREJÃO-SILVA, 2006). A evaporação é influenciada por quatro fatores principais, sendo eles, energia externa, grau de saturação do ar circundante, velocidade do vento e disponibilidade de água (GIACOMONI, 2005).

Goergen (2010) refere-se que a passagem de água do estado líquido para o gasoso compreende uma mudança no estado físico, havendo a necessidade de energia na forma de calor para que tal processo ocorra, neste caso o calor latente de evaporação λ . O calor latente de evaporação é a quantidade de energia necessária para evaporar a massa de um grama de água estando à mesma a certa temperatura (GIACOMONI, 2005), podendo ser obtido conforme Chow *et al.* (1988), através da equação:

$$\lambda = 2,501 - 0,00237 \cdot T \quad (1)$$

Sendo T a temperatura em °C e λ o calor latente de evaporação em MJ.kg⁻¹. Conforme a Equação 1 podemos observar que λ é função apenas da temperatura, assim, quanto menor a temperatura da água, maior será o calor latente de evaporação.

A mudança de estado da água para a forma gasosa é dada através do aumento da energia cinética das moléculas, causando assim, o dispêndio de certa quantidade de calor (calor latente de vaporização). Logo, a transição da fase líquido-vapor ou sólido-vapor depende do saldo de energia disponível à superfície-fonte e, por conseguinte, da temperatura (VAREJÃO-SILVA, 2006). O calor latente de evaporação não sofre grande variação entre as temperaturas 10 °C e 30 °C se consideramos condições médias de evaporação na natureza. Por este motivo, muitas aplicações consideram um valor constante de $2,501 \times 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ (PEREIRA *et al*, 1997).

Com base na Lei de Dalton das pressões parciais, cada gás exerce uma pressão parcial que independe da presença de outros gases, e a pressão total é igual à soma das pressões parciais das componentes (GOERGEN, 2010), e é conhecida como *pressão atual de vapor* ou *pressão parcial de vapor* (e_a) (PEREIRA *et al*, 1997).

O aumento da temperatura do sistema pela injeção de calor gera um aumento da evaporação e para essa nova temperatura o ar deixa de estar saturado, pois as moléculas de água deixaram o gás. O ar funciona como um fluido que se expande/contrai com o aumento/decréscimo da temperatura e com isso, a cada temperatura o ar apresenta diferente *pressão de saturação* (e_s) (GIACOMONI, 2005). Conforme Chow *et al.*, (1998), a equação abaixo fornece um valor aproximado de e_s , em função da temperatura.

$$e_s = 0,611 \cdot \exp \left[\frac{17,27 \cdot T}{237,3 + T} \right] \quad (2)$$

Sendo e_s a pressão de saturação (kPa) e T a temperatura (°C).

O aumento da temperatura gera um aumento da pressão de vapor de saturação e conseqüentemente um aumento na capacidade da atmosfera em armazenar vapor de água, gerando uma relação exponencial, conforme pode ser observado na Figura 1.

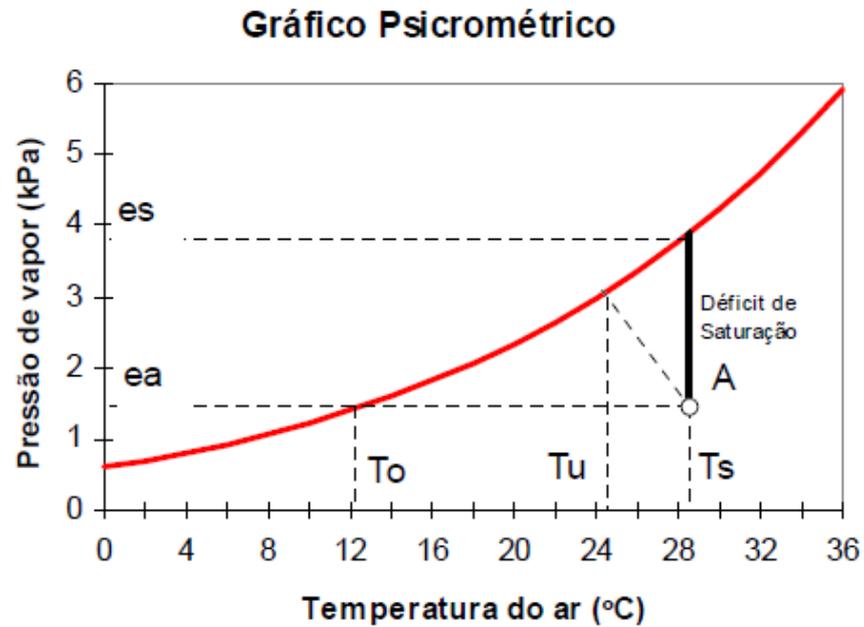


FIGURA 1. Gráfico psicrométrico que relaciona a pressão de vapor de saturação com a temperatura. Fonte: Pereira *et al.*, (2000).

Geralmente a pressão parcial de vapor é menor que a pressão de saturação e a diferença entre essas pressões é denominada *déficit de saturação* (Δe):

$$\Delta e = e_s - e_a \quad (3)$$

Outra variável meteorológica importante que é estimada a partir das pressões de saturação e pressão parcial de vapor é a Umidade Relativa, sendo expressa como:

$$UR(\%) = 100 \times \frac{e_a}{e_s} \quad (4)$$

Quando a pressão parcial de vapor e a pressão de saturação são iguais, temos uma atmosfera saturada, logo a umidade relativa será 100%. Já quando a pressão parcial de vapor é nula, teremos um ar totalmente seco e valor de umidade relativa nula.

2.1.1 Transpiração

A transpiração é definida como o processo biofísico pelo qual a água que fez parte do metabolismo da planta é transferida para a atmosfera preferencialmente pelos estômatos. As raízes das plantas são responsáveis pela retirada de nutrientes e água do solo, sendo esta água transportada para cima através do caule e liberada pelas folhas através dos estômatos, local onde ocorre a vaporização (ALLEN *et al.*, 1998).

Em geral, os estômatos ficam abertos durante o dia e à noite se fecham, exceto em condições de estresse hídrico, que permanecem fechados. Isso ocorre devido a disponibilidade de água no solo ou quando a transpiração da planta não atende a demanda da atmosfera. A deficiência hídrica causa a não dissipação de energia, ocasionando assim, um aumento da temperatura e, conseqüentemente, aumento do déficit de saturação.

A transpiração, bem como a evaporação direta, depende do fornecimento de energia, da pressão de vapor e do vento. Assim, variáveis meteorológicas como a radiação, temperatura do ar, umidade do ar e vento devem ser considerados quando se avalia a transpiração. O teor de água no solo e a capacidade do solo para conduzir a água para as raízes também determina a taxa de transpiração, assim como a salinidade da água. A taxa de transpiração também é influenciada por características da cultura, aspectos ambientais e práticas de cultivo (ALLEN *et al.*, 1998).

2.1.3 Evapotranspiração (ET)

Evapotranspiração é definida pela soma da água perdida para a atmosfera a partir da superfície do solo pela evaporação, e dos tecidos das plantas através da transpiração, sendo um componente vital do ciclo da água, que inclui precipitação, escoamento, vazão de água do solo, armazenamento e ET (MU *et al.*, 2007). O processo de evapotranspiração pode ser afetado pela energia disponível,

capacidade de transporte do vapor d'água através da turbulência originada pelo vento, quantidade de água no solo e os fatores fisiológicos da planta.

A ET potencial (ETP) definida por Penman (1948) é dada pelo processo, no qual, a água é transferida para a atmosfera por na unidade de tempo, por uma superfície totalmente coberta por vegetação saudável, de porte baixo, em desenvolvimento e sem restrição de água no solo.

A diversidade da vegetação levou a necessidade de uma padronização para termo de ET, devido às diferenças entre as culturas, surgindo assim às definições de ET potencial ou de referência (ETP ou ETo), a evapotranspiração da cultura (ETc), evapotranspiração real (ETr), evapotranspiração de Oásis (ETO), entre outras. A evapotranspiração de referência (ETo) é definida como a quantidade de água que seria utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, com a altura entre 8 e 15 cm, com crescimento ativo e o solo completamente coberto sem déficit de água. A ETo é limitada somente ao balanço de energia, podendo ser estimada por equações teórico-empíricas desenvolvidas e testadas para várias condições climáticas (PEREIRA *et al.*, 2002). O método Penman-Monteith é recomendado pela FAO como o único método padrão para determinar a ETo (ALLEN *et al.*, 1998).

A quantidade de água que é utilizada pela cultura em qualquer fase de seu desenvolvimento, desde o plantio até a colheita, sem restrição hídrica é definida como da cultura (ETc). A ETc varia conforme o índice de área foliar (IAF), quanto maior o IAF maior será a evapotranspiração. (PEREIRA *et al.*, 2000). O estágio de desenvolvimento da cultura e a ETo estão relacionadas com a ETc, conforme a equação abaixo:

$$ETc = Kc \cdot ETo \quad (5)$$

Sendo que Kc é o coeficiente da cultura, variando conforme as fases fenológicas, e também entre as espécies cultivadas. A Figura 2, mostra a variação do Kc em função do IAF e seu consumo de água. Note que no início do desenvolvimento (fase I) os valores de Kc são próximos a zero. Conforme a cultura vai desenvolvendo-se (fase II e fase III), esse valor aumenta chegando a um máximo. Na fase IV temos o período da senescência onde os valores de Kc decrescem.

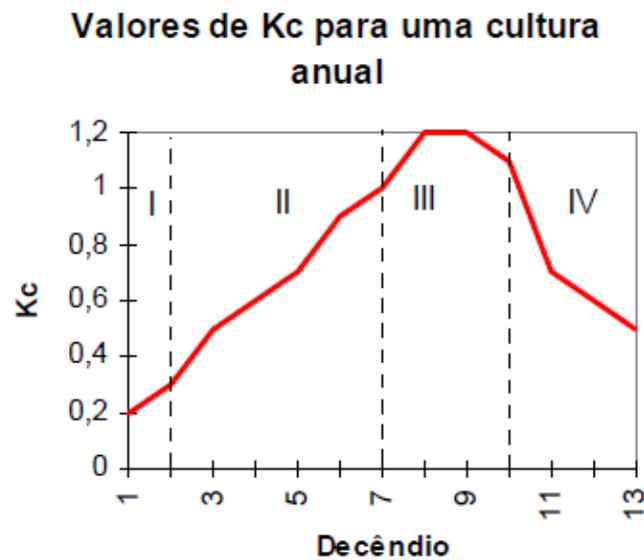


FIGURA 2. Relação entre as fases de desenvolvimento fenológico e Kc para uma cultura anual. Fonte: Adaptado de Pereira *et al.*, (2000).

A ET real (ET_r) é definida como a perda de água de uma superfície vegetada, em qualquer condição de umidade e de cobertura vegetal, sendo a evapotranspiração que realmente ocorre. A ET_r geralmente, é menor que a ET_c, devido à restrição de água no solo que eventualmente ocorre durante o ciclo de culturas agrícolas (GOERGEN, 2010).

Segundo Pereira *et al.*, (2002), a ET de Oásis (ETO) é descrita pela quantidade de água que é utilizada por uma pequena área vegetada (irrigada) vizinha de uma grande área seca, que provém energia por advecção (transporte de calor através do deslocamento de massa).

Para a estimativa de ET, devem-se levar em conta as condições da área de estudo, pois a evolução no crescimento da cultura vai determinar qual o processo que irá contribuir de forma representativa na estimativa. Em uma região agrícola iremos encontrar vários estágios vegetativos, onde, na fase de semeadura o solo encontra-se totalmente exposto a radiação, ocasionando uma grande perda de água por evaporação governando a evapotranspiração. A partir do desenvolvimento da cultura, a área de dossel aumenta gerando uma diminuição na fração de radiação que chega ao solo, assim, a transpiração passa a ser determinante para a ET. O processo descrito acima pode ser visualizado na Figura 3, onde o IAF representa as diferentes fases de desenvolvimento vegetativo com relação à evapotranspiração relativa evaporação e transpiração.

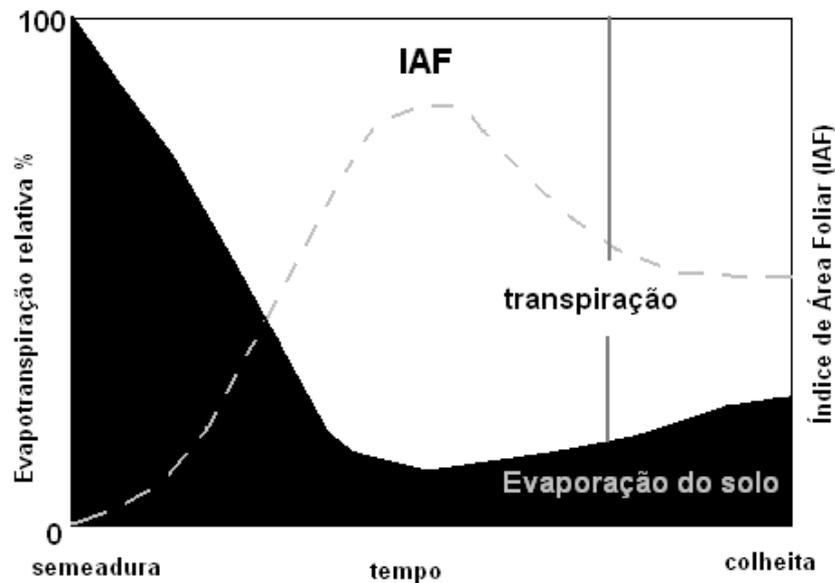


FIGURA 3. Relação entre evapotranspiração relativa e crescimento da planta. Fonte: Adaptado de Allen *et al.*, (1998).

2.2 Métodos de estimativa de Evapotranspiração

2.2.1 Aspectos gerais

Atualmente a literatura apresenta diversos métodos para a estimativa da ET, sendo classificados em métodos diretos ou indiretos. O lisímetro de drenagem é o método direto mais comumente utilizado, onde consiste em um tanque preenchido com um volume de solo, instalado até uma determinada profundidade, para a área que se deseja estimar a evapotranspiração. A determinação da ET é obtida através de uma simples equação: $ET = I - D$, sendo I a água fornecida (irrigação) e D a água percolada (drenagem).

A ET é controlada pela disponibilidade de energia radiativa, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água para as plantas no solo (PEREIRA *et al.*, 1997). A incidência de radiação em uma determinada região depende de vários fatores, entre eles, latitude, topografia da região e época do ano. Conforme Pereira

et al. (1997), a disponibilidade de energia é controlada pelo coeficiente de reflexão-albedo onde superfícies mais claras refletem mais, portanto têm menos energia disponível.

Entre os métodos indiretos utilizados para estimativa de ET tem-se desde os mais simples como o método de Thornthwaite, baseado apenas na temperatura média como variável independente, ou o método de Balanço de Energia, baseado no saldo de radiação, até métodos mais complexos, como o padrão pela FAO Penman-Monteith, que necessita diversas variáveis meteorológicas para o cálculo.

Medeiros (2002) avaliou a estimativa da ETo, utilizando medidas lisimétricas e métodos de estimativa de ETo que foram comparados com os valores obtidos a partir da equação de Penman-Moneith (ALLEN *et al.*, 1998). A análise foi realizada para o período de março a junho dos anos de 1997 a 1998, sendo os dados coletados a partir de uma Estação Experimental do Vale do Curu, Paraipaba - CE, juntamente com o lisímetro de pesagem. Os resultados obtidos mostraram que os dados do lisímetro se ajustaram de forma regular com a ETo estimada através do método Penman-Moneith.

Conforme Medeiros (2002), o desempenho dos métodos de estimativa de ETo em relação às estimativas feitas pelo método padrão Penman-Moneith, variam com a escala de tempo adotada, havendo piora com o aumento do intervalo de tempo.

Oliveira & Carvalho (1998) avaliaram a correlação entre diferentes métodos utilizados na estimativa de ETo e seu efeito na demanda de irrigação suplementar, para a cultura de milho, nas cidades de Seropédica e Campos - RJ. Os resultados apresentaram bom ajuste para os métodos de FAO-Penmanm, FAO-Radiation e Hargreaves, comparados com o método Penman-Moneith. O método Radiação-FAO foi aquele que apresentou o menor erro-padrão de estimativa do método e já quanto ao ajuste pela equação de regressão linear, todos os métodos apresentaram boa correlação, com valores iguais ou superiores a 95%.

Mendonça *et al.* (2003) desenvolveram um estudo na estação evapotranspirométrica da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), onde apresentava um lisímetro de pesagem com 6 m² de área, instalado no centro de uma área de 900 m², cultivada com grama tipo Batatais. O objetivo da pesquisa foi a comparação entre os valores da ETo obtidos em lisímetro de pesagem com grama com os valores estimados a partir dos métodos Penman-Monteith – FAO, Radiação

Solar, Makkink, Linacre, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Tanque Classe A e Atmômetro SEEI modificado. Os resultados obtidos na pesquisa mostraram que os métodos de Radiação Solar, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani e Tanque Classe A, superestimaram o lisímetro em todo o período estudado, enquanto, os métodos de Makkink e Atmômetro subestimaram a ETo determinada pelo lisímetro em 4,2 e 38,3% respectivamente. Já para os valores médios ocorridos no período de estudo, o método de Makkink foi o que mais se aproximou dos valores medidos no lisímetro, seguido pelo método de Penman-Monteith – FAO.

Vescove & Turco (2005) realizaram a comparação dos seguintes métodos de estimativa da ETo: Radiação Solar, Makkink e Tanque Classe A, em relação ao método padrão Penman-Monteith, para dois períodos distintos das fases de desenvolvimento da cultura de citros. Os resultados obtidos pelos autores, através da comparação com o método padrão, mostraram que o método Makkink subestimou a evapotranspiração para o período inverno-primavera. Já o método da Radiação solar superestimou a ET no período verão-outono e o método Tanque Classe A superestimou a ET nos dois períodos.

A não verificação da adequação dos métodos de estimativa da ETo às condições climáticas, a falta de precisão na estimativa, bem como o erro, devido ao uso de instrumentos de medidas inadequados, em geral, conduzem ao manejo inadequado da água, afetando muitas vezes a produção agrícola. Aplicações insuficientes ou em excesso resultam em perdas e prejuízos consideráveis às plantas e ao solo, diminuindo, dessa forma, a eficiência do uso da irrigação, Araujo *et al.* (2011).

Goergen *et al.* (2009) realizaram um estudo com imagens do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), juntamente com o banco de dados SALDAS (*South American Land Data Assimilation System*), onde, através do método Penman-Monteith, buscou estimar a evapotranspiração para a região da Bacia do Prata. Utilizando a média anual dos forçantes meteorológicos para o ano de 2000 e a média anual de IAF, os autores estimaram a evapotranspiração para a bacia, onde, concluíram que a ET não se distribui de forma homogênea, apresentando grande variação em diferentes áreas da região de estudo e que o método subestimou a ET média anual.

Descreveu-se no ítem a seguir, de forma detalhada, os métodos de estimativa de ET Penman-Monteith e Correlações Turbulentas, pois estes foram os métodos utilizados neste trabalho.

2.2.2 Método Penman-Monteith (PM)

O método Penman-Monteith é considerado pela FAO como o método padrão para o cálculo da estimativa de ETo, a partir de dados meteorológicos. Conforme Georgen (2010), a equação de PM utiliza dados termodinâmicos, aerodinâmicos, resistência ao fluxo de calor sensível e vapor d'água no ar (r_a), e resistência da superfície (planta) à passagem de vapor d'água (r_s). A equação combinada de Penman-Monteith para a estimativa da ET é:

$$ET = 86,4 \cdot \left(\frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \right) \frac{1}{\lambda \rho_w} \left[\frac{mm}{dia} \right] \quad (6)$$

Em que: Δ representa a inclinação da curva de pressão de vapor [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$]; R_n é o saldo de radiação diário [$W \cdot m^{-2}$]; G é o fluxo de calor no solo [$W \cdot m^{-2}$]; ρ_a é a densidade média do ar a pressão constante [$1,2 \text{ kg} \cdot m^{-3}$]; c_p é o calor específico do ar a pressão constante [$1.013 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]; e_s é a pressão de vapor de saturação [kPa]; e_a descreve a pressão atual de vapor [kPa]; γ é a constante Psicométrica [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$]; r_s é a resistência superficial [$s \cdot m^{-1}$]; r_a é a resistência aerodinâmica [$s \cdot m^{-1}$]; λ calor latente de vaporização [$MJ \cdot \text{kg}^{-1}$]; ρ_w massa específica da água [$1000 \text{ kg} \cdot m^{-3}$]. O valor 86,4 é um fator de conversão de $W \cdot m^{-2}$ para $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ (0,0864) e de metros para milímetros (10^3).

Para realização do cálculo de estimativa da ET é necessário realizar uma breve discussão de algumas variáveis meteorológicas presentes na equação. Abaixo será feita uma breve definição destas variáveis.

A inclinação da curva de pressão de vapor (Δ) é obtida pelo gradiente $\Delta = de_s/dT$ representando a inclinação da curva de pressão de saturação, conforme a equação abaixo:

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} = \frac{4.098 \cdot e_s}{(237,3 + T)^2} \quad (7)$$

Sendo: e_s a pressão de vapor de saturação (kPa); e T a temperatura (°C).

O Saldo de Radiação (R_n) é obtido a partir da soma das quatro componentes radiativas em superfície: radiação de onda curta incidente ($OC \downarrow$), radiação de onda longa emitida pela atmosfera para a superfície ($OL \downarrow$), radiação de onda curta refletida pela superfície ($OC \uparrow$) e radiação de onda longa emitida pela superfície ($OL \uparrow$). A equação abaixo descreve o Saldo de Radiação:

$$R_n = OC \downarrow + OL \downarrow - OC \uparrow - OL \uparrow \quad (8)$$

O valor de R_n poderá ser positivo ou negativo. Durante o período diurno, o balanço de ondas curtas (BOC) é positivo e à noite é nulo. Já o sinal do balanço de ondas longas (BOL) depende dos valores de $OL \downarrow$ e $OL \uparrow$. Geralmente, o valor diário do BOL em uma superfície natural é negativo. Isso faz com que nas superfícies naturais, o valor diurno do BOC torne R_n positivo nesse período do dia enquanto que à noite, sendo BOC igual a zero e o BOL negativo, tem-se R_n negativo (a superfície tem perda de energia) (PEREIRA *et al.*, 2000).

O R_n pode ser obtido também através da equação (9), onde são considerados apenas os fluxos verticais e a taxa líquida em que a energia está sendo transferida horizontalmente (ALLEN *et al.*, 1998).

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (9)$$

Sendo: G fluxo de calor no solo; H fluxo de calor sensível; λET fluxo de calor latente, no qual representa a fração da evapotranspiração. A variação diurna das componentes do balanço de energia podem ser observadas na Figura 4.

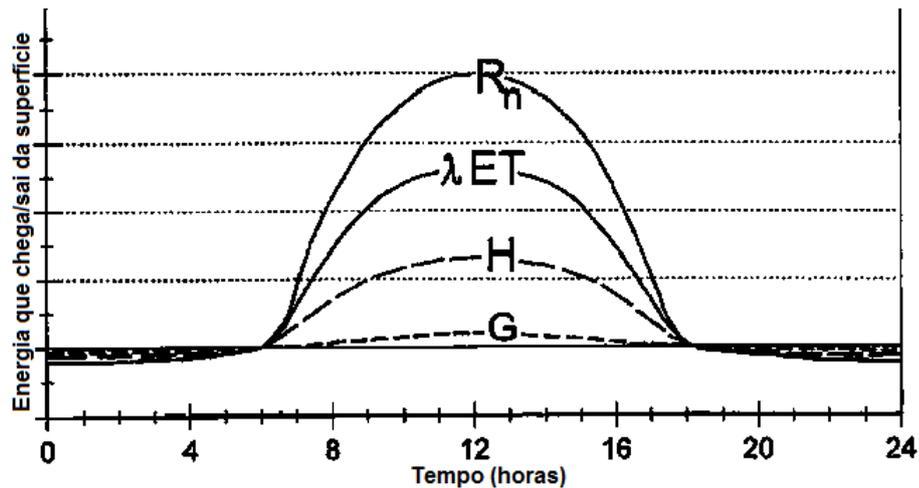


FIGURA 4. Representação esquemática da variação diurna das componentes do balanço de energia acima de uma superfície bem irrigada transpirante em um dia de céu limpo. Fonte: adaptado de Allen *et al.*, (1998).

O Fluxo de calor no solo (G) é definido pela energia que gera o aquecimento das camadas inferiores do solo através do processo molecular via condução. Valores positivos de fluxo de calor no solo referem-se ao aquecimento e valores negativos estão associados ao resfriamento. Podemos expressar o fluxo de calor no solo por:

$$G = 0,1.R_n \quad (10)$$

Segundo Allen *et al.* (1998), para estimativas diárias de evapotranspiração o valor de fluxo de calor no solo pode ser desprezado do cálculo, devido aos valores serem relativamente pequenos.

A pressão que o vapor gera sobre uma superfície é definida como Pressão atual de vapor (e_a), representada pela equação abaixo:

$$e_a = \frac{q \cdot P}{0,622 + 0,38 \cdot q} \quad (11)$$

Sendo: q a umidade específica do ar; e P a pressão atmosférica [kPa].

Para densidade média do ar a pressão constante (ρ_a) foi utilizado o valor de $1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ que corresponde a uma temperatura média do ar de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e pressão de 1 atm.

Embora a equação de PM-FAO seja, do ponto de vista teórico, uma das mais completas e precisa na estimativa da ET, sua implementação é dificultada devido a necessidade de uma grande quantidade de dados meteorológicos (temperatura, velocidade do vento, pressão atmosférica, umidade específica do ar, componentes radiativas do saldo de radiação, etc.) e de parâmetros que descrevam a vegetação (GOERGEN, 2010).

2.2.3 Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos

A metodologia desenvolvida pelo método das correlações turbulentas visa realizar estimativas dos fluxos de calor sensível, de calor latente ou fluxo de vapor d'água, e do transporte de momentum, baseando-se em séries temporais de medidas de alta frequência de variáveis meteorológicas (SANTOS, 2009). Os fluxos turbulentos de calor sensível (H) e latente (λET) podem ser determinados a partir de (ARYA; HOLTON, 2001):

$$H = \rho_{ar} C_p \overline{\omega' T'} \quad (12)$$

$$\lambda ET = \rho_{ar} \overline{\omega' q'} \quad (13)$$

Sendo que: ρ_{ar} densidade do ar; C_p é o calor específico do ar à pressão constante; ω' flutuações da velocidade vertical do vento; T' expressa o desvio em relação à média da temperatura do ar (K); q' é o desvio em relação à média da umidade específica do ar (kg.kg^{-1}).

A utilização do método das correlações turbulentas é complicada por exigir sensores eficientes, muito pequenos e de resposta muito rápida, caso contrário não serão capazes de detectar a passagem de vórtices de diferentes tamanhos. As flutuações aumentam com a proximidade da superfície-fonte, face à redução do tamanho dos vórtices (VAREJÃO-SILVA, 2006; ROSEMBERG, 1974).

2.3 Comportamento espectral da vegetação

O sensoriamento remoto é uma técnica que permite obter informações de objetos na superfície terrestre sem o contato físico. Essas informações são obtidas através da detecção da Radiação Eletromagnética (REM) emitida ou refletida pela superfície terrestre. Os sensores remotos são utilizados para detectar a REM refletida e/ou emitida pelos objetos de interesse localizados na superfície da Terra (LILLSESAND; KIEFER, 1987), sendo o alvo de interesse nesta pesquisa a vegetação.

A interação entre a REM com a vegetação resulta na caracterização do comportamento espectral da vegetação, no qual, envolve o estudo dos fatores influentes na reflexão da radiação por folhas isoladas e por dosséis de vegetação (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). O estudo de vegetação, utilizando dados de sensoriamento remoto, é muito comum o uso da reflectância de superfície (porção de radiação solar incidente que é refletida pela superfície), devido à facilidade desta ser medida remotamente e, principalmente devido às respostas características da vegetação.

Para compreender as interações da radiação solar com a vegetação, primeiramente deve-se estudar as propriedades ópticas da folha (VANE; GOETZ, 1988). A folha é o principal elemento do dossel vegetativo a contribuir para o sinal detectado pelos sensores remotos, sendo que as propriedades espectrais de uma única folha estão em função de sua composição química, morfologia e estrutura interna (D'ARCO, 2008).

A quantidade de REM refletida pelas folhas é influenciada por três principais mecanismos, sendo eles: pigmentos presentes nas folhas, espaços ocupados pela

água e ar, e estrutura celular interna. A radiação solar ao atingir o dossel vegetativo resulta em três frações, no qual, uma parte da radiação é absorvida ($\approx 50\%$ que chega a planta) pelos pigmentos da folha participando do processo de fotossíntese, altera as estruturas moleculares (fotoconversão), acelera reações como a foto-oxidação das xantofilas, ou ainda destrói estruturas moleculares. Outra fração desta radiação é refletida pela folha. A última fração sofre o processo de transmissão, no qual, é realizado através das camadas de folhas que compõem a copa (MOREIRA, 2001).

A Figura 5 representa a curva de reflectância de uma folha verde sadia em relação às regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (IVP) e infravermelho médio (IVM) do espectro eletromagnético, juntamente com os fatores determinantes do seu comportamento.

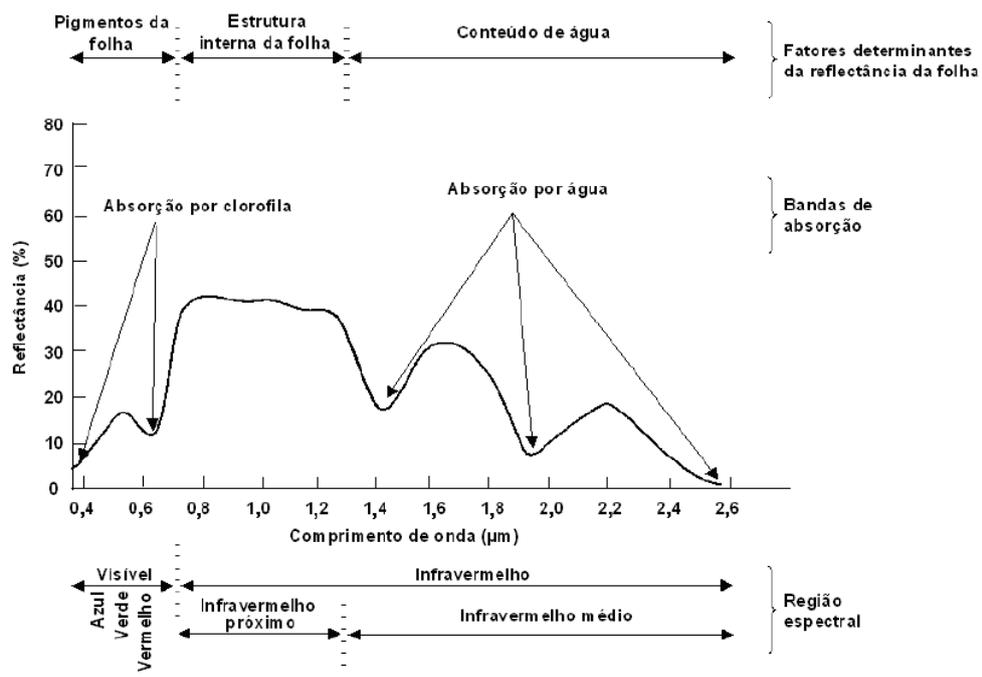


FIGURA 5. Curva de reflectância de uma folha verde sadia. Fonte: Moreira, (2005).

A região do visível (VIS), intervalo compreendido entre 0,4 a 0,7 μm de espectro eletromagnético é denominada faixa de radiação fotossinteticamente ativa. A vegetação, nesta região, apresenta uma alta absorção da radiação incidente, devido aos pigmentos fotossintéticos presentes nas folhas (clorofila, xantofila, carotenóides etc.). A reflectância nesta faixa é pequena menor de 20%, porém há

um pico de reflexão no comprimento de onda de 0,55 μm (verde), no qual, responsável pela coloração esverdeada da maioria das folhas. A região do vermelho no espectro eletromagnético possui uma relação inversamente proporcional entre a intensidade da REM refletida com a quantidade de clorofila presente no dossel. Assim, com o aumento da cobertura vegetal e conseqüentemente o incremento na quantidade de pigmentos celulares por área, presentes em um número de folhas, a quantidade da REM refletida no vermelho diminui, devido ao aumento da absorção da REM incidente (JENSEN, 2000).

A região do infravermelho próximo (IVP) corresponde à faixa espectral entre 0,7 a 1,3 μm . Nesta região, temos um aumento considerável quando comparado a faixa do VIS. Este resultado deve-se ao forte contraste entre os índices de refração do conteúdo celular e do espaço intercelular, que provoca reflexões e refrações da REM no interior da folha (KNIPLING, 1970). Nesta faixa do espectro, a vegetação apresenta elevada reflectância e transmitância, estando próximo de 45 a 50%, e uma reduzida absorptância em torno de 5%.

A região do infravermelho médio (IVM) está no intervalo de 1,3 a 2,6 μm do espectro eletromagnético. Nesta faixa do espectro, a reflectância das folhas diminui devido às fortes bandas de absorção da água nos intervalos de 1,4; 1,9; e 2,7 μm (LILLESAND; KIEFER, 1999). Quando o conteúdo de água da folha diminui, a reflectância nesta região aumenta (SOUSA, 1997).

As medidas de reflectância podem ser transformadas em índices de vegetação, resultando nas transformações lineares da reflectância obtida em duas ou mais bandas do espectro eletromagnético. O índice vegetativo de interesse nesta pesquisa é o IAF, no qual, será abordado mais adiante.

2.4 A cultura do arroz

2.4.1 Aspectos relevantes

O arroz é uma das principais culturas de grãos produzida no mundo, sendo de grande importância para a alimentação da população mundial, constituindo-se como uma das principais fontes de energia para a maioria dos seres humanos. Anualmente a área cultivada com arroz, em cenário mundial, é de aproximadamente 150 milhões de hectares, produzindo 590 milhões de toneladas, sendo que mais de 75% desta produção é oriunda do sistema de cultivo irrigado, (EMBRAPA, 2007). Conforme a FAO (2000), o continente asiático produz 90% de toda a produção de arroz mundial, já o continente americano produz 9,1% e o restante é produzido pelo continente africano (AZAMBUJA *et al.*, 2004).

Os países do sudeste asiático concentram a maior produção de arroz e também as maiores taxas de consumo, por exemplo, a China que é o maior produtor (cerca de 30% da produção mundial) e também é o maior consumidor mundial de arroz (DARCO, 2008).

O Brasil nos últimos anos vem apresentando um aumento significativo da produção de lavouras orizícolas, mesmo que a área plantada apresenta um declínio, a produção obteve um aumento. A região sul destaca-se por ser 70% da produção de arroz no Brasil, sendo o sistema de cultivo por irrigação (ALVES, 2009; IBGE, 2007). Apesar dos altos níveis de produtividade de arroz, existe uma grande variabilidade da produção ao longo dos anos causada fundamentalmente pelas condições climáticas. A ocorrência de baixas temperaturas e inadequada radiação solar, durante as fases críticas de crescimento da cultura, são dois fatores intimamente relacionados a essa variabilidade (D'ARCO, 2008), bem como a ocorrência de um grande volume de precipitação durante o plantio e colheita da cultura de arroz.

O Rio Grande do Sul é um dos maiores produtores do Brasil de cultura agrícola de verão, sendo o arroz irrigado um dos principais produtos conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O Estado gaúcho cultiva

cerca de 950 mil hectares de arroz irrigado, representando aproximadamente 48% do total produzido no Brasil. O rendimento médio no Estado é em torno de 5.500 Kg.ha⁻¹, bastante acima da média de 2.770 Kg.ha⁻¹ (KLERING, 2007).

As áreas de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul estão classificadas em seis regiões político-administrativas segundo o Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), conforme Figura 6. O município de interesse nesta pesquisa encontra-se na região 3 (Depressão Central) e tem como núcleo a cidade de Cachoeira do Sul.

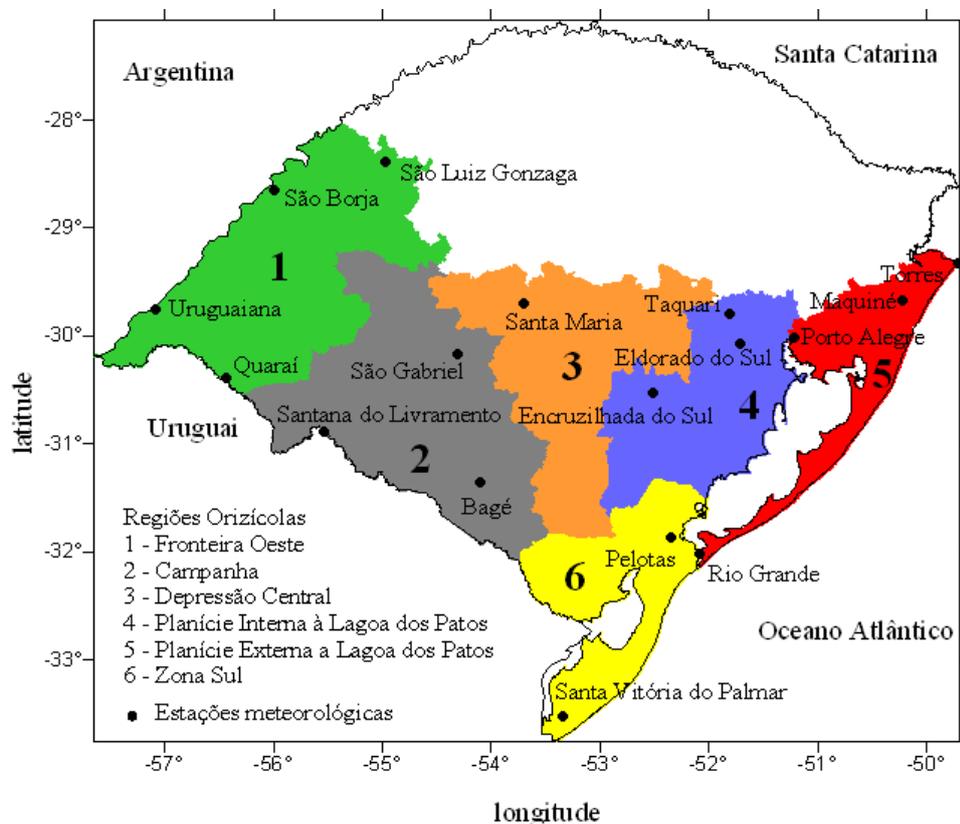


FIGURA 6. Mapa das regiões com cultura de arroz no Rio Grande do Sul. Fonte: Klering, (2012).

A percentagem de área colhida em cada uma das regiões Orizícolas é apresentada na Figura 7 para o período de safras entre 2010/11 a 2012/13. Através desta figura, observou-se que a Fronteira Oeste apresentou a maior percentagem de área colhida nas safras de 2010/11 e 2011/12, com respectivos valores de 69,7% e 78,0%. Para a safra de 2012/13, a região que apresentou maior valor da percentagem de área colhida foi a Planície Costeira Externa (Região 5, Figura 6), com valor de 71,3%.

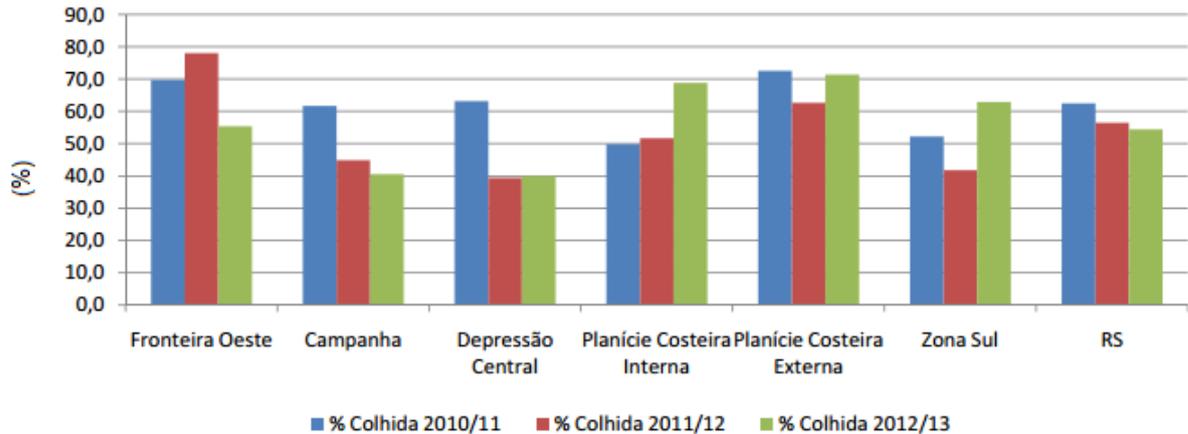


FIGURA 7. Percentagem de área colhida nas regiões de cultura de arroz no Rio Grande do Sul. Fonte: IRGA, (2013).

A Figura 8 representa a produtividade de arroz para as 6 regiões orizícolas do Rio Grande do Sul no período de safras de 2010/11 a 2012/13. Verificou-se através desta figura que as safras de 2010/2011 e 2011/12 apresentaram a maior produtividade de arroz na Região da Fronteira Oeste, já para a safra de 2012/23 a região que apresentou a maior produtividade foi a Depressão Central.

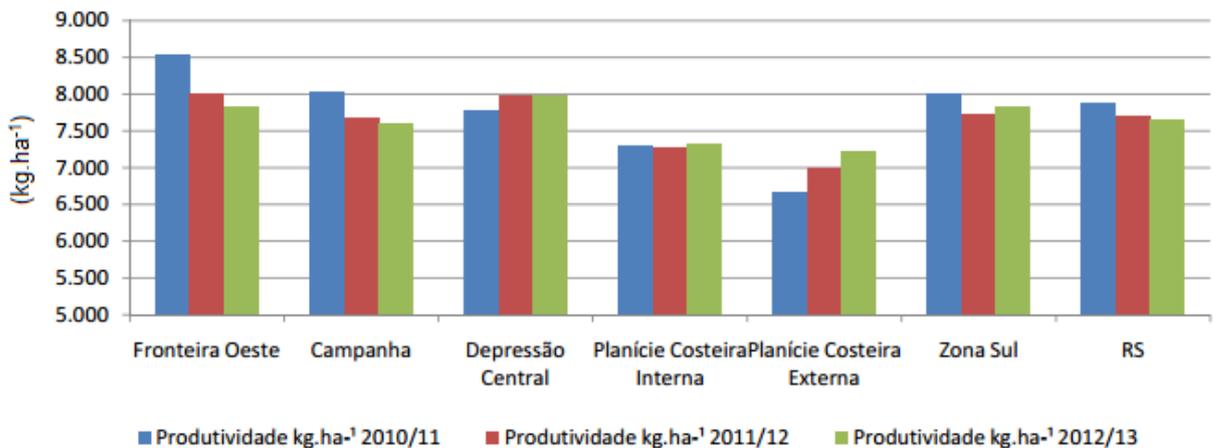


FIGURA 8. Produtividade da cultura de arroz para as diferentes áreas de cultivo no Rio Grande do Sul. Fonte: IRGA, (2013).

2.4.2 Condições climáticas para a cultura de arroz

Embora o Rio Grande do Sul apresente bons níveis no rendimento de arroz irrigado, existe certa variabilidade interanual associada, principalmente, às variações nas condições meteorológicas (CARMONA; BERLATO, 2002). No entanto, em alguns anos, ocorrem quedas na produtividade causadas, fundamentalmente, por condições climáticas adversas, tais como a ocorrência de baixas temperaturas (frio) e baixa disponibilidade de radiação solar durante os períodos críticos da planta (STEINMETZ; BRAGA, 2001).

Estabelecer a época de semeadura adequada, através da determinação dos períodos de risco climático é uma das práticas fundamentais para a obtenção de altos níveis de produtividade, aumentando as chances de que as fases críticas da planta escapem dos períodos climáticos adversos coincidindo com os favoráveis (D'ARCO, 2008).

A temperatura do ar é uma das variáveis meteorológicas que exerce grande influência sobre o crescimento, desenvolvimento e rendimento do arroz. Conforme Steinmetz & Braga (2001), outra variável meteorológica que pode afetar a produtividade, em determinados anos e localidades, são os grandes volumes de chuvas que causam inundações, ou ainda, o baixo nível de precipitação que provoca estiagem. Os vendavais e granizos também influenciam a produtividade das culturas de arroz.

Conforme Yoshida (1981), as temperaturas ótimas para o desenvolvimento da cultura de arroz variam entre 20 e 35 °C para a germinação, de 30 e 33°C para a floração e de 20 a 25°C para a maturação. Baixas temperaturas podem reduzir o desenvolvimento da planta, causando assim aumento do ciclo da cultura e esterilidade das espiguetas, resultando na queda de produção do arroz.

Durante os períodos iniciais da cultura de arroz, a temperatura do solo é de fundamental importância para a germinação e emergência, sendo o limite inferior de 12,3°C para ocorrência da emergência das plântulas (KWON *et al.*, 1996). As fases de pré-floração e floração são muito sensíveis às baixas temperaturas, apresentando um limite mínimo para a temperatura do ar de 15 °C como referência

em estudos climatológicos relacionados com a cultura de arroz (MOTA, 1994; STEINMETZ; BRAGA, 2001).

Conforme Oldman *et al.* (1986), regiões onde a temperatura do ar não é um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento do arroz irrigado, a radiação solar é uma das principais variáveis que influenciam a produção de grãos. A quantidade de radiação solar exigida pela cultura varia de acordo com a fase fenológica, sendo o período reprodutivo e de maturação mais críticos à radiação solar, pois a baixa disponibilidade de energia solar leva a um decréscimo na produtividade causado pela redução de espiguetas.

Outros fenômenos meteorológicos que se devem levar em conta são o El Niño e a La Niña. Estes fenômenos estão ligados diretamente com as condições climáticas imposta nesta região, acarretando em mudanças no regime de nebulosidade e precipitação pluvial (CARMONA; BERLATO, 2002).

2.4.3 Ciclo fenológico

O ciclo do arroz no Estado do Rio Grande do sul varia entre 100 e 140 dias (ARROZ IRRIGADO, 2005), sendo a época mais adequada para semeadura nos meses de outubro a novembro (DARCO, 2008). O arroz irrigado apresenta seu máximo desenvolvimento geralmente entre os meses de janeiro e fevereiro, logo após este período inicia-se a colheita, ocorrendo entre os meses de março a maio (MAFFEI, 1981).

O ciclo do arroz pode ser dividido em três fases distintas: vegetativa, reprodutiva e de maturação, conforme Tabela 1. A fase vegetativa é determinada a partir da germinação da primeira semente até o período em que a panícula começa a se diferenciar. A fase reprodutiva tem duração de aproximadamente 30 dias, iniciando com a diferenciação do primórdio da panícula e tendo seu término com a floração completa. A última fase é a de maturação tendo início logo após a plena floração e terminando com a maturação total das sementes, esta fase apresenta duração em torno de 30 dias (MAGALHÃES JR. *et al.*, 2004).

TABELA 1. Fases e etapas do crescimento da cultura de arroz. Fonte: Magalhães Jr. *et al.*, (2004).

| | |
|-------------------|--|
| Fase vegetativa | germinação e emergência plântula perfilhamento elongação do colmo |
| Fase reprodutiva | diferenciação do primórdio floral crescimento da panícula floração |
| Fase de maturação | grão leitoso grão pastoso maturação |

2.4.4 Evapotranspiração na cultura de arroz irrigado

A ET é o maior consumidor de energia disponível, especialmente na agricultura irrigada, consumindo cerca de 60 a 80% do saldo de radiação na fase de crescimento (SUYKER; VERNA, 2008). Nas fases iniciais do cultivo de arroz irrigado, a ET é fortemente afetada pela evaporação do solo, devido a pouca quantidade de biomassa da cultura, apresentando valores de ET próximos a 2 mm.dia⁻¹ (ALBERTO *et al.*, 2011). Após um período de aproximadamente 30 dias, a partir da semeadura, o arroz é inundado com uma lâmina de água, no qual afeta diretamente a quantidade de calor latente liberado na atmosfera. Conforme o desenvolvimento da cultura, a quantidade de biomassa aumenta até cobrir todo o solo e lâmina de água, fazendo a transpiração ser o processo dominante na ET. No período de máximo desenvolvimento da cultura de arroz, a ET atinge valores próximos a 5 e 7 mm.dia⁻¹.

2.4.5 Comportamento espectral do arroz irrigado

Os primeiros estágios da cultura de arroz irrigado são fortemente afetados pela lâmina de água presente na lavoura, proveniente do sistema de irrigação. Esta lâmina de água, juntamente com sedimentos em suspensão e o solo afetam diretamente a resposta espectral do arroz irrigado em sua fase inicial. Conforme Chang *et al.* (2005), os valores de reflectância na região do VIS são ligeiramente inferiores aos valores no IVP nos estágios iniciais.

A variação da biomassa, em lavouras de arroz irrigado, afeta diretamente a reflectância no IVP, causando um aumento de 15% no estágio inicial do perfilhamento para 50% no estágio do espigamento. Na fase de maturação, os valores de reflectância apresentam uma queda, chegando em aproximadamente 33%. A região do VIS, apresenta valores de reflectância inversamente proporcionais ao vigor da planta, sendo de 10% no início da emergência, 2% até o estágio de florescimento e de 17% até a maturação (CASANOVA *et al.*, 1998).

2.5 Sensor MODIS – Satélites TERRA e AQUA

O sensor MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) da NASA, é um fundamental instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua, foi projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera nas regiões do VIS e do IV (infravermelho) do espectro eletromagnético.

O satélite Terra foi lançado em 18 de dezembro de 1999, sendo o primeiro do programa EOS (*Earth Observing System*). Essa plataforma possui os sensores MODIS, CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), MISR (*Multi-angle Imaging Spectro Radiometer*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e o MOPITT (*Measurement of Pollution in the Troposphere*).

A órbita do satélite Terra é quase-polar com inclinação de 98,2° e heliosíncrona com passagem pelo Equador às 10:30 h na sua órbita descendente.

A excentricidade é de 0,0012, órbita de altitude média de 707,8 km (variando de 700 a 737 km). A repetitividade é de 16 dias no Equador. A distância entre órbitas adjacentes é de 172 km. O período orbital é de 98,88 minutos e a precisão de determinação da órbita é de 150 m. A plataforma Terra pesa 5.190 Kg, com carga útil de 1.155 Kg. A taxa de transmissão de dados é de: 12,5 - 15 Mbps (transmissão direta); 105 Mbps (transmissão de gravação); 16 Kbps (telemetria); e 10 Kbps (comando operação) (RUDORFF *et al.*, 2007).

O satélite Aqua foi lançado em 04 de maio de 2002, sendo o segundo lançado pelo programa EOS, levando consigo o Sensor MODIS e mais cinco instrumentos a bordo: o AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*), AMSU-A (*Advanced Microwave Sounding Unit-A*), HSB (*Humidity Sounder for Brazil*), AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS*) e CERES.

A órbita do satélite Aqua por ser quase-polar com uma inclinação de 98°, é também heliossíncrona, cruza o Equador às 13:30 h na sua trajetória ascendente. A altitude da plataforma é de 705 km com um período orbital de 99 minutos, um eixo orbital semi-principal de 7.085 km e uma excentricidade de 0,0015. Possui vida útil de missão projetada para 6 anos (RUDORFF *et al.*, 2007).

O sensor MODIS fornece alta sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais que variam no comprimento de onda de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético conforme pode ser visto na Tabela 2. Duas bandas são adquiridas na resolução de 250 m, outras cinco bandas na resolução de 500 m e as demais 29 bandas em 1 km. O ângulo de varredura é de 55° para cada lado na órbita de 705 km de altura resulta numa faixa imageada de 2.330 km, com cobertura global em dois dias.

A partir desta grande quantidade de bandas, foram desenvolvidos e disponibilizados 44 produtos MODIS para a comunidade científica, sendo, MOD15 produto de interesse neste trabalho.

TABELA 2. Especificações do espectrorradiômetro do MODIS para as Bandas 1 a 36. Fonte: Rudorff *et al.*, (2007).

| Uso Principal | Banda | Largura de Banda (nm) | Radiância espectral |
|--|-------|-----------------------|---------------------|
| Terra/Nuvens/ Aerossóis limite | 1 | 620-670 | 21,8 |
| | 2 | 841-875 | 24,7 |
| Terra/Nuvens/ Aerossóis Propriedades | 3 | 459-479 | 35,3 |
| | 4 | 545-565 | 29,0 |
| | 5 | 1230-1250 | 5,4 |
| | 6 | 1628-1652 | 7,3 |
| | 7 | 2105-2155 | 1,0 |
| Cor dos oceanos/ Fitoplâncton/ Biogeoquímica | 8 | 405-420 | 44,9 |
| | 9 | 438-448 | 41,9 |
| | 10 | 483-493 | 32,1 |
| | 11 | 526-536 | 27,9 |
| | 12 | 546-556 | 21,0 |
| | 13 | 662-672 | 9,5 |
| | 14 | 673-683 | 8,7 |
| | 15 | 743-753 | 10,2 |
| Vapor d'água atmosférico | 16 | 862-877 | 6,2 |
| | 17 | 890-920 | 10,0 |
| | 18 | 931-941 | 3,6 |
| Temperatura superfície/nuvens | 19 | 915-965 | 15,0 |
| | 20 | 3660-3840 | 0,45 (300K) |
| | 21 | 3929-3989 | 2,38 (335K) |
| | 22 | 3929-3989 | 0,67 (300K) |
| Temperatura atmosférica | 23 | 4020-4080 | 0,79 (300K) |
| | 24 | 4433-4498 | 0,17 (250K) |
| Vapor d'água de nuvens Cirrus | 25 | 4482-4549 | 0,59 (275K) |
| | 26 | 1360-1390 | 6,00 |
| Vapor d'água de nuvens Cirrus | 27 | 6535-6895 | 1,16 (240K) |
| | 28 | 7175-7475 | 2,18 (250K) |
| Propriedade de nuvens | 29 | 8400-8700 | 9,58 (300K) |
| Ozônio | 30 | 9580-9880 | 3,69 (250K) |
| Temperatura superfície/nuvens | 31 | 10780-11280 | 9,55 (300K) |
| | 32 | 11770-12270 | 8,94 (300K) |
| Altitude de topo de nuvens | 33 | 13185-13485 | 4,52 (260K) |
| | 34 | 13485-13785 | 3,76 (250K) |
| | 35 | 13785-14085 | 3,11 (240K) |
| | 36 | 14085-14385 | 2,08 (220K) |

2.5.1 Produto MOD15: Índice de Área Foliar (IAF) e Fração de Radiação Fotossinteticamente Ativa (FPAR)

O produto MOD15 gerado a partir do sensor MODIS, possui os parâmetros índice de área foliar (LAI; *Leaf Area Index*) e fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (FPAR; *Fraction of Photosynthetically Active Radiation*). O índice de área foliar, parâmetro de interesse neste trabalho, é gerado a partir de imagens captadas diárias ou dos mosaicos de imagens de 8 dias, com resolução espacial de 1 km. O IAF representa uma importante propriedade de estrutura do dossel da vegetação, medindo a área de folhas por unidade de área do terreno (RUDORFF *et al.*, 2007).

O algoritmo que realiza o cálculo do IAF tem como principal variável de entrada as imagens de refletância de superfície do sensor MODIS (Produto MOD09GQK) e sua respectiva condição de iluminação e de visada de 7 bandas espectrais centradas nos seguintes comprimentos de onda do espectro eletromagnético: 0,648; 0,858; 0,470; 0,555; 1,240; 1,640 e 2,130 μm . Apenas as bandas centradas no vermelho (0,648 μm) e no infravermelho (0,858 μm) são utilizadas, pois para as demais bandas existe um alto grau de incerteza associado aos valores de refletância da superfície (RUDORFF *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2001).

A segunda variável de entrada utilizada na geração da coleção 4 de imagens IAF – MODIS é um mapa global de bioma (Produto MOD12Q1 nível 3), no qual é gerado a partir da análise e classificação das imagens MODIS adquiridas ao longo do ano 2000. Este mapa é estratificado em seis biomas ou tipos de vegetação: cereais, arbustos, culturas latifoliadas, cerrado, floresta densa e floresta de pinheiro (RUDORFF *et al.*, 2007; FRIEDL *et al.*, 2002). Os dados de IAF são estimados por um sistema de *look-up-table* (LUT), que se baseia em um modelo de transferência radiativa tridimensional invertido, assim o algoritmo atribui um valor de IAF com base tanto na refletância obtida para um determinado *pixel* quanto no tipo de biomassa a que este bioma pertence.

Os valores de IAF do produto MOD15A2 podem variar entre 0 a 10, sendo que o produto possui ainda uma série de valores de preenchimento para o caso de

áreas não vegetadas ou *pixel* não computados (Rudorff *et al.*, 2007). A Tabela 3 mostra valores de preenchimento para o produto MOD15A2.

TABELA 3. Descrição de valores de preenchimento da coleção 4 do MOD15A2.
Fonte: Rudorff *et al.*, (2007).

| Valor | Descrição |
|--------------|---|
| 249 | Não classificado |
| 250 | Área Urbana |
| 251 | Áreas permanentemente alagadas |
| 252 | Neve, gelo, tundra |
| 253 | Desertos, ou vegetação muito esparsa |
| 254 | Água |
| 255 | Valor padrão de preenchimento, para <i>pixel</i> não computados ou fora da projeção |

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa, está localizada no município de Cachoeira do Sul - RS (Figura 9), nas coordenadas de latitude -30,28, longitude -53,15. O sítio experimental encontra-se em uma propriedade de cultivo de aproximadamente 1000 ha com arroz irrigado. O período de cultivo do arroz, na safra de 2010/2011, foi de outubro a março, apresentando um total de 148 dias cultivados.

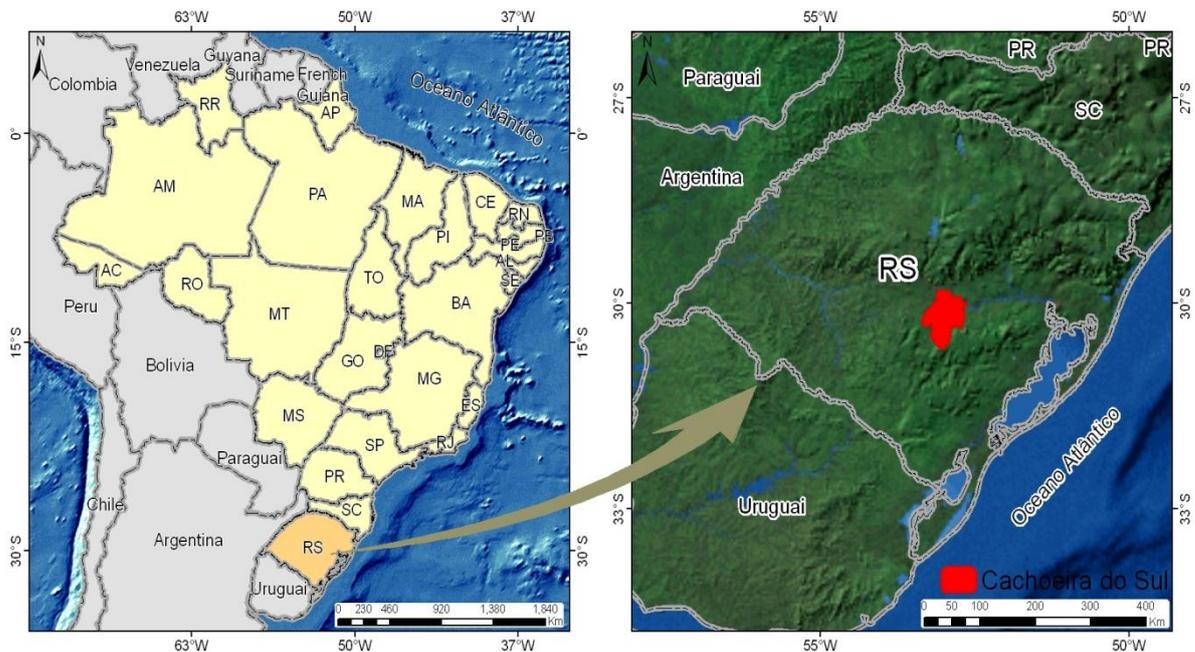


FIGURA 9. Localização do município de Cachoeira do Sul - RS.

Conforme os dados Sulflux, este sítio experimental permanece sem qualquer tipo de cultura entre as safras de arroz irrigado. Outra informação importante, é que 30 dias após a realização da semeadura do arroz, o campo é inundado até formar uma lâmina de água com aproximadamente 10 cm de espessura, permanecendo durante todo o período de cultivo, conforme a Figura 10.

Coletas de dados meteorológicos a partir de uma estação micrometeorológica foram feitas no local. Recentemente dados de IAF, biomassa e altura da cultura vêm sendo medidos na área experimental.

(a)



(b)



FIGURA 10. Lavoura de arroz irrigado do sítio experimental (a); Visão geral da área de estudo (b) em Cachoeira do Sul - RS.

3.2 Período de estudo

Os dados meteorológicos da Rede SulFlux, no sítio experimental de Cachoeira do Sul - RS, são coletados desde 10 de outubro de 2009 pela torre micrometeorológica do Laboratório de Micrometeorologia da UFSM (L μ Met). A safra de 2009/2010 apresentou grandes falhas na coleta de dados meteorológicos para a safra do arroz irrigado, logo a utilização destes dados seria precária para descrever a ET. O ano que apresentou uma melhor qualidade dos dados foi de 2010 e 2011, sendo assim, o período de estudo escolhido, entre 13 de outubro de 2010 a 26 de março de 2011, descrevendo todo o comportamento da ET com desenvolvimento do arroz irrigado desde a sua semeadura até a época da colheita.

3.3 Banco de dados

Para desenvolvimento deste trabalho foi necessário à utilização de dados de torres meteorológicas da Rede SulFlux e INMET e dados de IAF obtidos a partir do Sensor MODIS e coletados em campo pelo SulFlux. Segue abaixo uma descrição dos dados utilizados.

3.3.1 Dados da Rede SulFlux

A Rede SulFlux (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas) foi criada em novembro de 2008 em parceria com as instituições: UFSM (Universidade Federal de Santa Maria), UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), UFV (Universidade Federal de Viçosa), UFPR (Universidade Federal do Paraná), FURG (Universidade Federal do Rio Grande) e INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). O projeto SulFlux foi criado com o objetivo de

estabelecer uma rede de observações de longo período para as interações entre a superfície e a atmosfera, e assim, quantificar o saldo de transferência, os fluxos de CO_2 e demais grandezas físicas para a região sul do Brasil, e principalmente o estado do Rio Grande do Sul.

A rede SulFlux é formada por um conjunto de torres ou estações micrometeorológicas, equipadas com sensores padrões, no qual, realizam medidas de alta frequência em diferentes tipos de ecossistemas. As observações, obtidas através das estações, fornecem dados de alta qualidade para inicializarem e validarem modelos numéricos, de clima e superfície para a região sul do país. As regiões de instalação das torres compreendem áreas de cultivo agrícola, pecuária, silvicultura, mata atlântica e reserva ambiental.

Os dados meteorológicos utilizados nesta pesquisa, coletados a partir da estação micrometeorológica de Cachoeira do Sul-RS (Figura 11), foram: pressão atmosférica, temperatura do ar, saldo de radiação e velocidade do vento. Dados de IAF recentemente vêm sendo coletados para este sítio experimental, e foram também utilizados neste trabalho.

Os dados de ET experimental (ET_r), obtidos a partir do Método de Covariância dos Vórtices Turbulentos, foram disponibilizados pela Rede SulFlux



FIGURA 11. Torre micrometeorológica do projeto Sulflux em Cachoeira do Sul - RS.

Os sensores instalados na torre micrometeorológica de Cachoeira do Sul, foram:

- Pressão (1 m; Vaisala PTB220A piezo-resistance);
- Temperatura do ar (3m; Campbell Scientific - CSAT 3);
- Componentes da velocidade do vento (3m; Campbell Scientific -CSAT 3);
- Precipitação (Campbell Scientific - CSI Model TB4 Raingage);
- Radiação de onda curta incidente (6 m; Kipp & Zonen - CMB6);
- Saldo de Radiação (3,4 m; Kipp & Zonen NR LITE);
- Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente (PAR) (0,5 m; Kipp & Zonen PAR LIT);
- H₂O no ar (3 m; LiCor LI-7500);
- CO₂ no ar (3 m; LiCor LI-7500);
- Fluxo de Calor no Solo (-2 cm; Campbell Scientific - HFP01SC-L);
- Temperatura do Solo (-2 cm; Campbell Scientific - Termopar Tipo E - TCAV - L).

3.3.2 Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet)

O INMet é um órgão criado com o objetivo de prover informações meteorológicas para a sociedade brasileira. O instituto realiza o monitoramento, análise e previsão de tempo e de clima para todo o Brasil, fundamentando a pesquisa aplicada e compartilhamento do conhecimento com ênfase em resultados práticos e confiáveis. Este órgão representa o Brasil junto a Organização Meteorológica Mundial (OMM), sendo responsável pelo tráfego de mensagens coletadas pela rede de observação meteorológica da América do Sul juntamente com os demais centros que compõem o Sistema de Vigilância Meteorológica Mundial.

O sistema de coleta e distribuição de dados Meteorológicos (temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, precipitação, entre outras variáveis) do INMet, é dotado de estações de sondagem de ar superior (radiossonda); estações meteorológicas de superfície, operadas

manualmente; e por rede de estações automáticas, sendo o maior da América do Sul.

Os dados das estações meteorológicas automáticas são disponibilizados de forma democrática e gratuita para toda a sociedade, quase em tempo real, pela página <<http://www.inmet.gov.br>>.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário a utilização de dados de umidade relativa da estação meteorológica de Rio Pardo - RS, devido à sua localização e altitude de estação ser mais próxima à área de estudo.

3.3.3 Dados de Índice de Área Foliar (IAF)

Os dados do Sensor MODIS são disponibilizados a partir do endereço <<ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/>>, onde encontrou-se o produto MOD15A2 que possui os parâmetros de IAF e FPAR. Esses dados são gerados a partir de mosaicos de imagens de oito dias, com resolução espacial de 1 km, e formato HDF (*Hierarchical Data Format*).

Com a criação do bando de dados, devemos identificar qual a variável a ser extraída do arquivo original. Para realizar a identificação desta variável, que neste caso é o IAF, utilizou-se o programa *sdslist* que realiza a leitura dos dados e identifica as informações presentes nos arquivos, como nome da variável, resolução espacial, entre outros.

Para dar início ao trabalho com dados do IAF, criou-se um arquivo texto com o nome da variável. Após a criação deste arquivo executa-se o aplicativo *Modistool* (programa desenvolvido pela NASA), onde abrirá um console permitindo reprojetar o dado para projeção geográfica, desejada neste trabalho, e transformar do formato *HDF* para formato *Raw Binary*, permitindo assim a leitura do banco de dados no software GrADS (*Grid Analysis and Display System*).

Após a conversão do dado de IAF - MODIS para a projeção e formato de leitura do dado desejados foi preciso transformar o dado obtido no período de 8 dias para dados diários, sendo assim, repetido os mesmos valores de IAF para o intervalo de tempo entre as observações. A transformação do IAF para diário é um

passo importante, visto que, para o cálculo da Evapotranspiração necessita-se de dados de vegetação diários.

As medições realizadas pela Rede SulFlux, para dados de IAF, foram obtidas a partir do instrumento LI-COR, modelo LI - 3000A, com periodicidade de aproximadamente 15 dias, no qual foram disponibilizadas para a realização desta pesquisa.

3.4 Descrição das análises

A partir do período de estudo estabelecido, foi realizada a coleta dos dados meteorológicos e do IAF. Os dados da Rede SulFlux apresentam medições a cada 30 minutos, sendo o total diário de 48 medições. Os dados da Rede INMet apresentam medições a cada 1 hora. Já os dados de vegetação são fornecidos a cada 8 dias. Devido aos diferentes intervalos de medições, todos os dados foram transformados para diários, onde as variáveis meteorológicas estão em médias diárias e os dados de IAF foram repetidos os valores para os 8 dias de medição.

A falha nos dados meteorológicos da rede SulFlux, para alguns períodos, fez-se estabelecer alguns critérios para montagem do banco de dados. Os dias que apresentaram medições inferiores a 20% do total diário foram descartados do cálculo, pois poderiam causar grandes imprecisões na estimativa da ET. As medições diárias que apresentaram falhas inferiores ao padrão estabelecido foram realizadas médias do primeiro e último valor medido a fim de preencher todas as falhas nas medidas.

Após a criação do banco de dados foi iniciado o cálculo de estimativa da ET através do Método Penman-Monteith, utilizando a Equação (6) conforme já descrita anteriormente. O cálculo teve como base, estimar as variáveis iniciais de entrada para a equação ET, sendo necessário determinar primeiramente: pressão de vapor de saturação, inclinação da curva de pressão de vapor, pressão atual de vapor, calor latente de vaporização, constante psicrométrica, resistência aerodinâmica e resistência superficial.

A primeira variável a ser estimada, a pressão de vapor de saturação, foi obtida através da Equação (2), utilizando apenas dados de temperatura. Esta variável também foi utilizada para determinar inclinação da curva de pressão, sendo estimada a partir da Equação (7). Para determinação da pressão atual de vapor utilizamos a Equação (4) a partir dos dados de umidade relativa obtidos da estação meteorológica do INMet, e dos dados, anteriormente estimados, de pressão de vapor de saturação (e_s).

Para determinação do calor latente de vaporização λ , foi utilizada a Equação (1), no qual depende somente da temperatura do ar. Já para a determinação da Constante Psicrométrica (γ) foi necessário aplicarmos a equação abaixo:

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{0,622 \times \lambda} \quad (14)$$

Sendo: γ Constante Psicrométrica kPa.°C⁻¹; o valor o médio do calor específico a pressão constante $c_p = 1.013 \times 10^{-3}$ MJ.kg⁻¹.°C⁻¹; P é a pressão atmosférica em kPa; λ calor latente de vaporização MJ.kg⁻¹.

A Resistência Aerodinâmica (r_a) é definida como a resistência que a camada de ar gera para transportar vapor d'água e calor para cima da vegetação, devido à altura da planta e velocidade do vento. Os valores de r_a foram obtidos através da equação proposta por Allen *et al.* (1998):

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{0m}} \right] \cdot \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{0h}} \right]}{k^2 \cdot u_z} \quad (15)$$

Sendo: z_m altura da medida do vento [m]; z_h altura da medida da umidade [m]; d deslocamento do plano zero [m]; z_{0m} comprimento de rugosidade da cultura para transporte de momento [m]; z_{0h} comprimento de rugosidade para o transporte de vapor e calor sensível [m]; k constante de Von Karman [0,41]; u_z velocidade do vento na altura z [m.s⁻¹].

O deslocamento do plano zero (d) representa a altura de momento conforme a cobertura vegetal, podendo ser estimado a partir da equação:

$$d = \frac{2}{3} \cdot ac \quad (16)$$

Sendo: ac a altura da cultura [m].

Wilke *et al.* (2012) ajustaram uma equação empírica para a estimativa da altura da cultura do arroz irrigado a partir da equação proposta por KELLIHER *et al.* (1993). Os valores de altura da cultura foram obtidos através da equação:

$$ac = 0,7 * (1 - e^{-0,5 * IAF_{MODIS}}) \quad (17)$$

Em que IAF é o índice de área foliar estimado a partir do sensor MODIS ($m^2 \cdot m^{-2}$).

Após obtido o valor de deslocamento do plano zero, podemos estimar o comprimento de rugosidade da cultura para transporte de momento (z_{0m}) e comprimento de rugosidade para o transporte de vapor e calor sensível (z_{0h}), conforme as equações abaixo:

$$z_{0m} = 0,123 \cdot ac \quad (18)$$

$$z_{0h} = 0,1 \cdot z_{0m} \quad (19)$$

Segundo Allen *et al.* (1998), a velocidade do vento utilizada na equação (15) deve ser medida na altura de 2 m assim como a altura de medição da umidade relativa, para resultar melhor precisão da estimativa de ET . Logo, fez-se necessário transformar a velocidade do vento, medida a 3 m de altura pela torre micrometeorológica Sulflux, através da equação:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad (20)$$

Sendo: u_2 medida da velocidade do vento a 2 m de altura [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]; u_z medida da velocidade do vento na altura z [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]; z altura da medida do vento [m].

A resistência superficial (r_s) representa a taxa do fluxo de vapor que encontra resistência devido à evaporação do solo e transpiração da vegetação, sendo determinada através da equação (Allen *et al.*, 1998):

$$r_s = \frac{r_l}{0,5 \cdot IAF} \left[\frac{s}{m} \right] \quad (21)$$

Em que: r_l é a resistência estomática da folha [$\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$]; IAF índice de área foliar [$\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$]. Para o cálculo da ET através do método PM, a resistência superficial foi substituída por G_s , sugerido por Cleugh *et al.* (2007), resultando na equação abaixo:

$$r_s = \frac{1}{G_s} \rightarrow G_s = c_l * IAF \quad (22)$$

Sendo, G_s a condutância superficial; c_l é a condutância superficial média por índice de área foliar com valor de 0,0022 sugerido por Cleugh *et al.* (2007); IAF índice de área foliar.

Após estimar todas as variáveis necessárias para o cálculo, a partir do Método Penman-Monteith, utilizou-se a Equação 6 para obter os resultados diários finais de estimativa da ET da cultura.

Inicialmente comparou-se as estimativas de ET realizadas com diferentes dados de IAF, obtidos a partir do sensor MODIS ($ET_{\text{PM-MODIS}}$) e dados experimentais de campo (ET_c), através de um gráfico de dispersão (1:1) e do coeficiente de correlação de Pearson (r). A significância da correlação foi avaliada através do teste *t-Student*. Verificou-se também, através de um gráfico de regressão linear, o coeficiente de determinação R^2 .

Por fim, foram comparadas as estimativas de ET_r , obtida através do método da covariância dos vórtices turbulentos, com a $ET_{\text{PM-MODIS}}$. Foram elaborados gráficos da evolução temporal das estimativas de ET. As diferenças foram

analisadas através de um gráfico de dispersão de (1:1) e do coeficiente de correlação de Pearson (r). A significância da correlação foi avaliada através do teste *t-Student*. Foi observado através de um gráfico de regressão linear, o coeficiente de determinação R^2 .

4. RESULTADOS

4.1 Condições Meteorológicas

A taxa de evapotranspiração está relacionada com a temperatura e umidade do ar, intensidade do vento e com a quantidade de radiação solar que chega a superfície, logo se fez necessário descrever e analisar essas variáveis meteorológicas influentes no cálculo da ET.

As condições meteorológicas ocorridas durante o período de estudo são apresentadas nas Figuras (12, 13, 14, 15). O saldo de radiação apresentado na Figura 12 é a principal componente meteorológica para estimativa da ET, sendo cerca de 80% desta energia radiativa absorvida pela fase de crescimento vegetativo (SUYKER; VERNA, 2008). A análise do R_n foi realizada a partir da média diária, apresentando valores entre 7,83 a 225,7 $W.m^{-2}$ para os respectivos dias 12 e 25 de dezembro 2010, já a média dos valores diários foi de 137,6 $W.m^{-2}$ e amplitude de 217,86 $W.m^{-2}$, conforme a Figura 12. No período de outubro até a o início de dezembro o saldo de radiação apresentou um comportamento crescente, após esta fase, observamos um período com maiores valores de energia radiativa durante a metade final de dezembro até aproximadamente 15 de janeiro. Os valores decrescem a partir do final janeiro.

Analisando os dados de temperatura observou-se uma amplitude de 13,8 °C e média para o período de 24,6 °C. O menor valor observado foi de 15,8 °C no dia 10 de novembro, conforme a Figura 13. Segundo dados do INMet (Tabela 4), a normal climatológica da temperatura em novembro é de 21,4 °C, sendo o valor encontrado abaixo da média. Pode-se observar também, que o máximo valor ocorreu no dia 27 de janeiro, sendo de 29,6 °C e assim acima da média climatológica de 24,6 °C Além disso, verificou-se que o período que apresentou os menores valores foi no final de outubro, estendendo-se até começo de novembro. Já os maiores valores foram

observados entre 13 de dezembro até começo de fevereiro, após esta etapa verifica-se um declínio da temperatura.

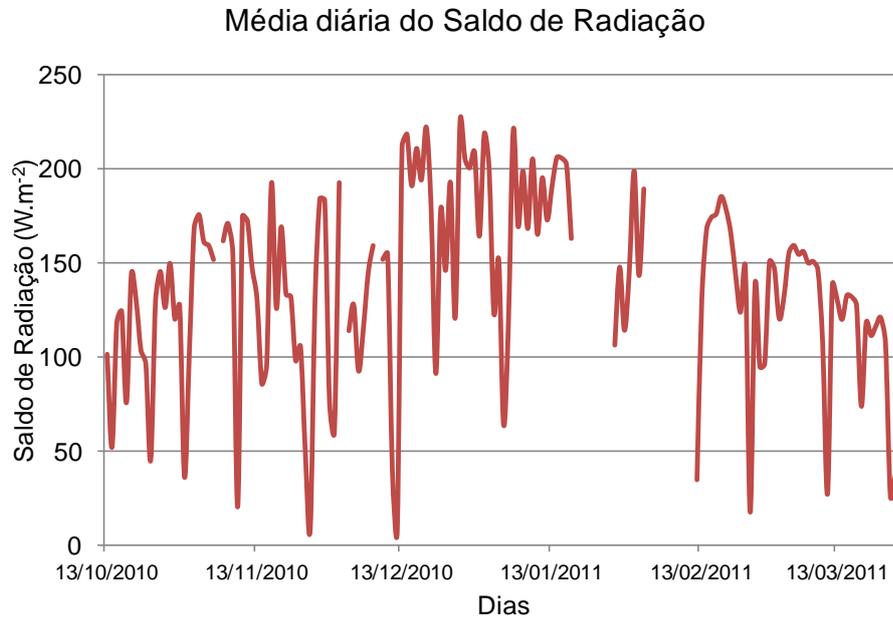


FIGURA 12. Média diária do Saldo de Radiação ($W.m^{-2}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

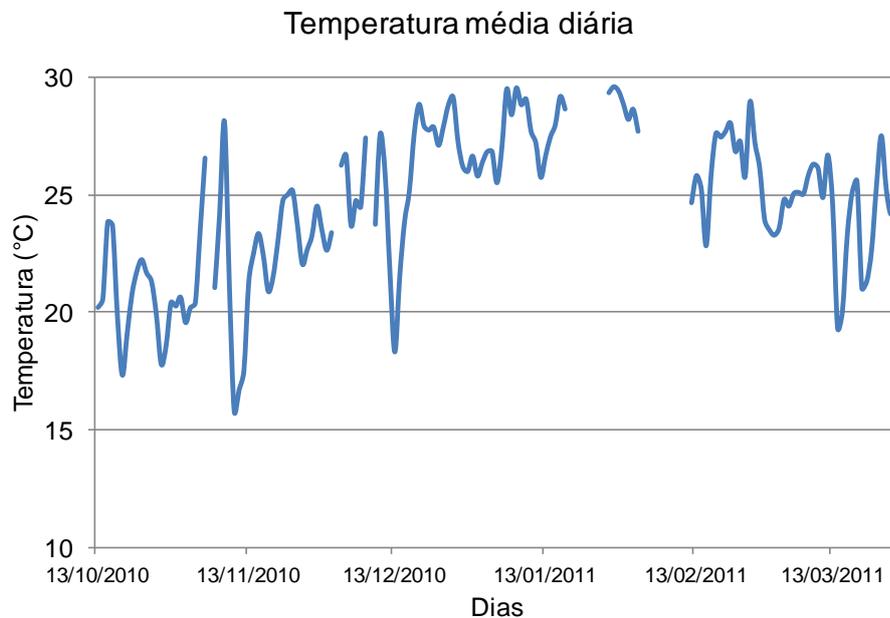


FIGURA 13. Temperatura média diária ($^{\circ}C$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

TABELA 4. Normais climatológicas (1961-1990) de temperatura (°C), umidade relativa (%) e velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Período: outubro a março.
Fonte: INMet.

| Mês | Variáveis meteorológicas | | |
|-----------|--------------------------|----------------------|---|
| | Temperatura (°C) | Umidade Relativa (%) | Velocidade do Vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)* |
| Outubro | 19,0 | 71,4 | 1,48 |
| Novembro | 21,4 | 68,4 | 1,35 |
| Dezembro | 23,7 | 66,1 | 1,16 |
| Janeiro | 24,5 | 69,2 | 1,05 |
| Fevereiro | 24,3 | 72,0 | 1,07 |
| Março | 22,3 | 74,8 | 0,94 |

*Vento a 2 m de altura.

A umidade relativa (Figura 14), no período de estudo, apresentou média de 75,7% e amplitude de 57,75%. O menor valor encontrado foi 38,3% no dia 31 de outubro. Conforme a Tabela 4, a normal climatológica da umidade relativa para o mês de março é de 71,4%, logo o valor observado encontrando-se abaixo da normal. Observou-se também que o maior valor foi de 96% no dia 24 de março, estando acima da normal climatológico de 74,8%.

A umidade relativa utilizada nesta pesquisa foi obtida a partir da estação meteorológica de Rio Pardo - RS. O comportamento observado, durante o período de outubro a janeiro, apresentou uma grande amplitude, sendo necessário um estudo mais detalhado das condições meteorológicas para verificar esta variação.

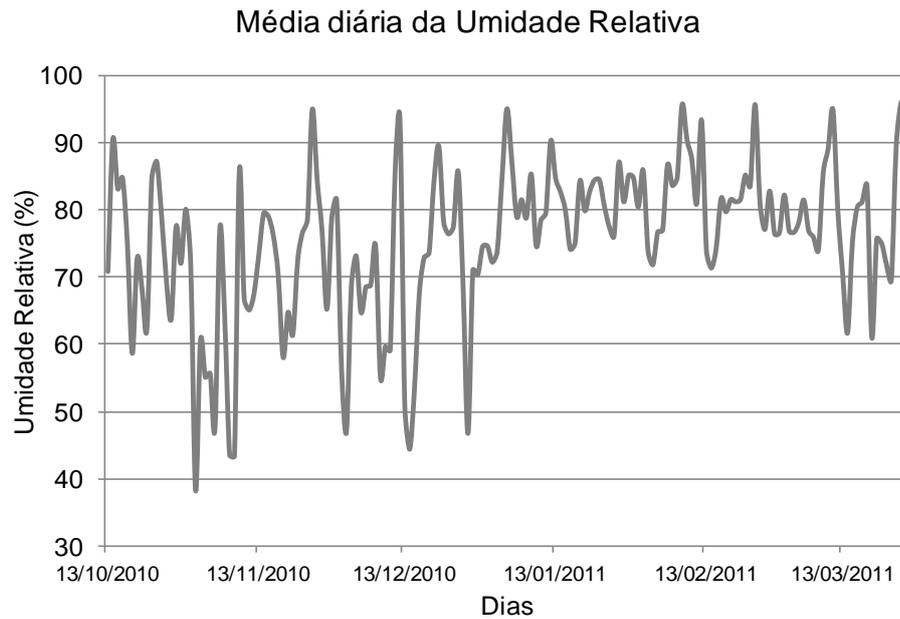


FIGURA 14. Média diária da umidade relativa (%). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

A análise da velocidade do vento foi realizada para a altura de 2 m. Conforme a Figura 15, observou-se maior intensidade no dia 16 de dezembro, com valor de $5,23 \text{ m.s}^{-1}$. Conforme a Tabela 4, a normal climatológica deste mês é de $1,16 \text{ m.s}^{-1}$, sendo o valor observado bem acima da média. Verificou-se que a menor intensidade do vento ocorreu no dia 25 de fevereiro, com valor de $0,71 \text{ m.s}^{-1}$ e normal climatológica de $1,07 \text{ m.s}^{-1}$. A velocidade do vento apresentou média para o período de $2,13 \text{ m.s}^{-1}$ e amplitude de $4,9 \text{ m.s}^{-1}$.

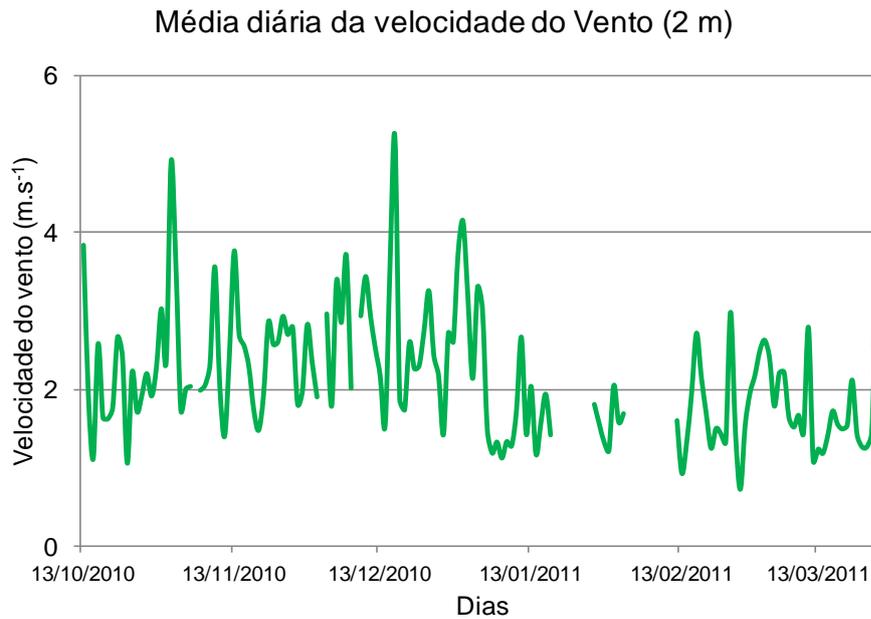


FIGURA 15. Média diária da velocidade do Vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

4.2 Sensoriamento Remoto e dados experimentais

Este item teve como objetivo comparar os dados de IAF obtidos a partir do sensor MODIS com os dados de campo da Rede SulFlux. As estimativas de altura da cultura foram obtidas através da Equação 17, utilizando dados IAF-MODIS. Após determinado os valores de altura da cultura, foi realizada a comparação destes dados com as medições experimentais da área de estudo.

A Figura 16 representa o comportamento temporal do Índice de Área Foliar do sensor MODIS juntamente com os dados coletados em campo. Observou-se, nesta figura, que os dados MODIS superestimaram os valores de IAF em relação às medições *in situ* para praticamente todo período, exceto entre os dias 10 a 18 de fevereiro, no qual o valor de IAF medido em campo ultrapassa os valores estimados pelo sensor remoto. Verificou-se também que o máximo pico de IAF ocorreu primeiramente pelo sensor MODIS em 2 de fevereiro, e logo após, para o SulFlux no dia 17 de fevereiro, com valores de 4,4 e 2,99 $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ respectivamente. Embora a resolução do sensor seja de 1 km, essa super estimativa provavelmente seja

decorrente da diferença entre a época de plantio em cada pequena área e também de possível vegetação nos córregos de água que alimentam as quadras de arroz.

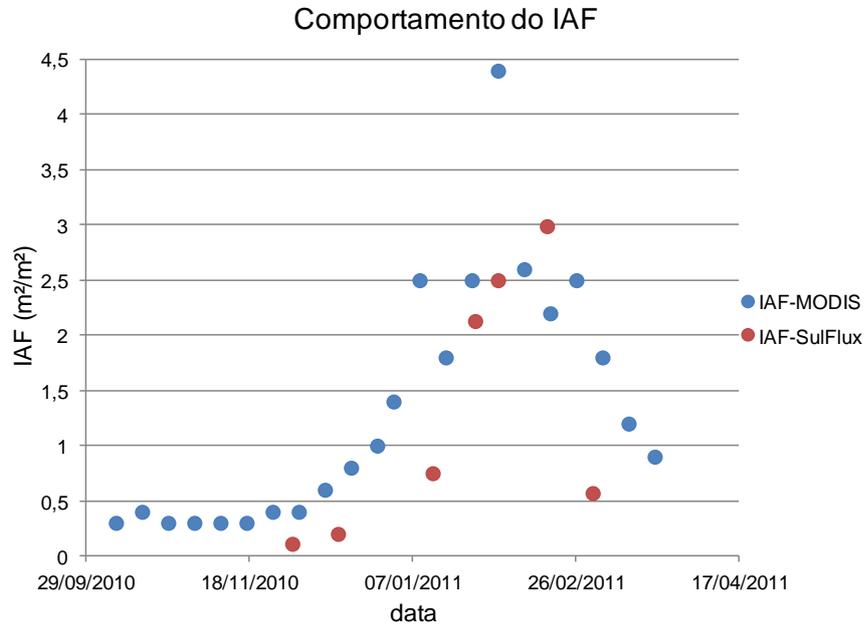


FIGURA 16. Comportamento do Índice de Área Foliar ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

Na Figura 17, observou-se que a altura da cultura, em praticamente todo o período de estudo, é maior para as medições em campo do que a estimada a partir dos dados de IAF-MODIS. Este resultado é coerente com o encontrado por Wilke *et al.*, (2012), segundo estes, a equação utilizada ainda necessita de ajustes para melhor representação dos dados de campo. No entanto, os autores consideram adequada a utilização da equação para o monitoramento da cultura.

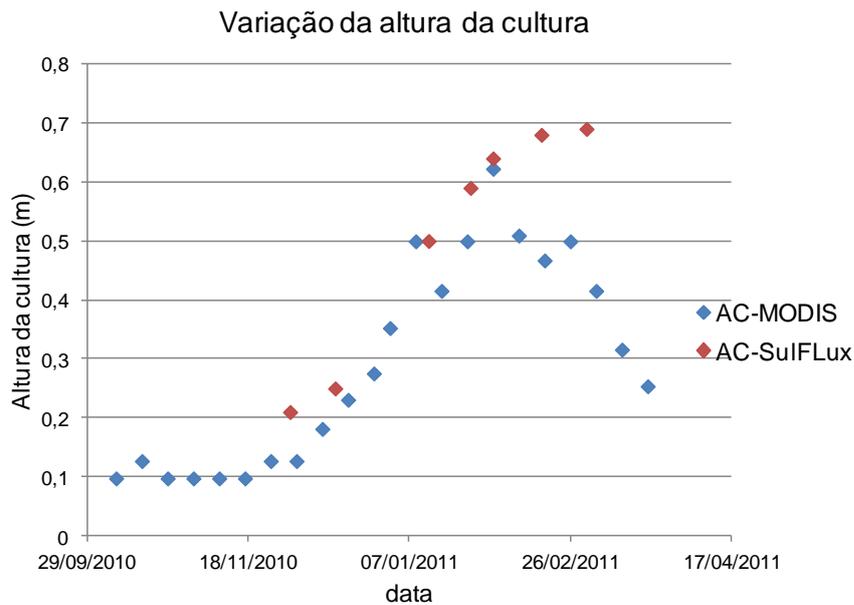


FIGURA 17. Variação da altura da cultura (m). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

4.3 Comparação entre as estimativas de Evapotranspiração

4.3.1 Comparação das estimativas $ET_{PM-MODIS}$ e ET_c com dados de IAF

Para uma melhor análise do comportamento da vegetação e seu efeito sobre a ET, realizou-se a plotagem das diferentes estimativas de ET obtidas através do IAF, a fim de observar a evolução temporal destas variáveis.

Conforme Alberto *et al.* (2011), a ET aumenta de forma consistente com um gradual aumento da radiação solar, temperatura do ar e IAF das plantas do arroz. Como as plantas atingem seu máximo pico de IAF durante o estágio de desenvolvimento reprodutivo, a radiação solar e temperatura do ar, bem como a ET atingem seu pico máximo de valor.

Na Figura 18, foi possível observar que no período de outubro até começo de dezembro que os valores de $ET_{PM-MODIS}$ foram mais baixos, bem como o IAF. Isto está ligado à fase inicial de desenvolvimento da cultura, além da influência de valores mais baixos de saldo de radiação (Figura 10) e temperatura (11). Conforme

a cultura vai se desenvolvendo, verificou-se que os valores de $ET_{PM-MODIS}$ aumentam atingindo seu máximo entre final de dezembro e metade de janeiro com valores entre 6 a 7 $mm.dia^{-1}$. Já os dados de IAF atingem seu máximo entre o final de janeiro e começo de fevereiro.

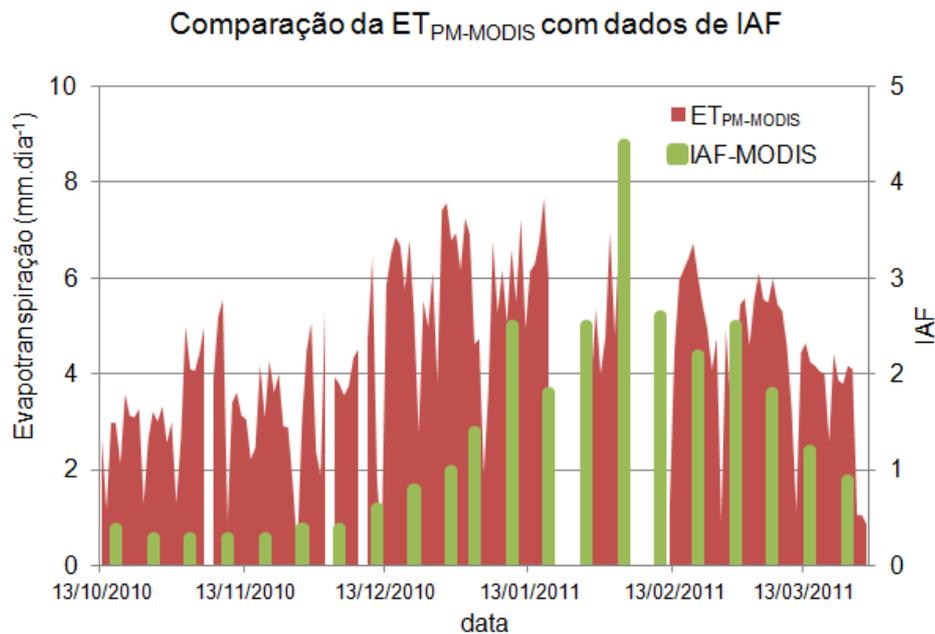


FIGURA 18. Comparação da evapotranspiração estimada pela $ET_{PM-MODIS}$ com dados de IAF-MODIS. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

A Figura 19 descreve a ET_c em relação aos dados de IAF obtidos em campo. Através desta figura, foi possível observar que o comportamento dos dados de ET_c e de IAF seguem o mesmo padrão. As máximas estimativas de ET_c foram encontradas no período de janeiro e fevereiro, com valores entre 6 e 7 $mm.dia^{-1}$.

Segundo Tabbal *et al.* (2002), os valores típicos de evapotranspiração da cultura de arroz nos trópicos são de 4 a 5 $mm.dia^{-1}$, na estação chuvosa, e de 6 a 7 $mm.dia^{-1}$ na estação seca. Conforme a Conab (2011), para este período de estudo, o mês de dezembro choveu acima da média no centro e no noroeste do Rio Grande do Sul, o que garantiu umidade suficiente no solo para o desenvolvimento das lavouras. Porém, as chuvas foram irregulares nos volumes acumulados e na distribuição entre as diversas regiões do estado, persistindo uma deficiência hídrica

acentuada em algumas áreas. Logo, os valores estimados de ET nesta pesquisa, estão de acordo com a estação seca.

Alberto *et al.* (2011), realizaram um estudo Laguna – Filipinas, estimando a ET em culturas de arroz irrigado e não irrigado, para estações secas e chuvosas, no período de 2008 e 2009. Os valores máximos de ET encontrados pelos autores foram entre 6 e 7 mm.dia⁻¹ para a cultura de arroz irrigado na estação seca, e para estação chuvosa esses valores ficaram entre 5 e 6 mm.dia⁻¹. O IAF do arroz irrigado apresentou valores máximos próximos a 6 m².m². Já a cultura de arroz não irrigado apresentou valores máximos de ET entre 5 e 6 mm.dia⁻¹ para estação seca, e de 4 a 5 mm.dia⁻¹ para a estação chuvosa. Os valores máximos de IAF para o arroz não irrigado foram próximos de 5 e 6 m².m². Sendo assim, os resultados obtidos neste trabalho coerente com os encontrados por estes autores.

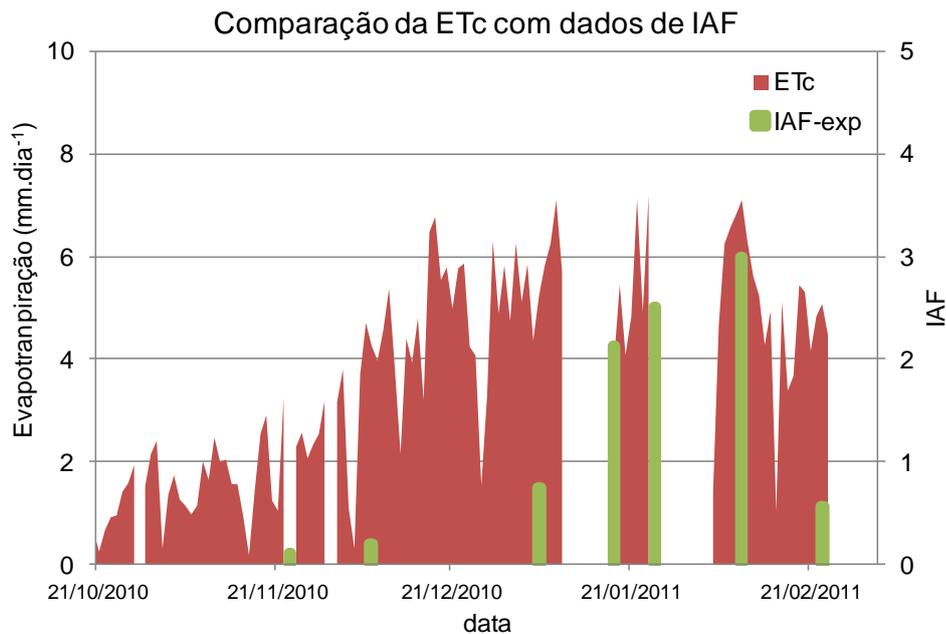


FIGURA 19. Comparação da evapotranspiração estimada pela ETc com dados de IAF experimentais. Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011.

4.3.2 $ET_{PM-MODIS}$ x ET_c

Na Figura 20 é apresentada a comparação entre a estimativa de $ET_{PM-MODIS}$ e a estimativa de ET_c , o primeiro utilizando dados de IAF do MODIS e o segundo utilizando dados de IAF experimentais. Observou-se que no período que se estende do início do ciclo até aproximadamente começo de janeiro a estimativa da $ET_{PM-MODIS}$ foi superior em relação à ET_c . Este comportamento provavelmente pode ser atribuído ao observado no item anterior, no qual se constatou que IAF-MODIS superestimou os dados medidos em campo, assim resultando nestas diferenças entre as estimativas de ET.

No período que se estende do início de janeiro até o final do ciclo da cultura, verificou-se que as diferenças de IAF-MODIS com o medido em campo foram menores (Figura 16), podendo assim, resultar na menor diferença entre as estimativas de ET.

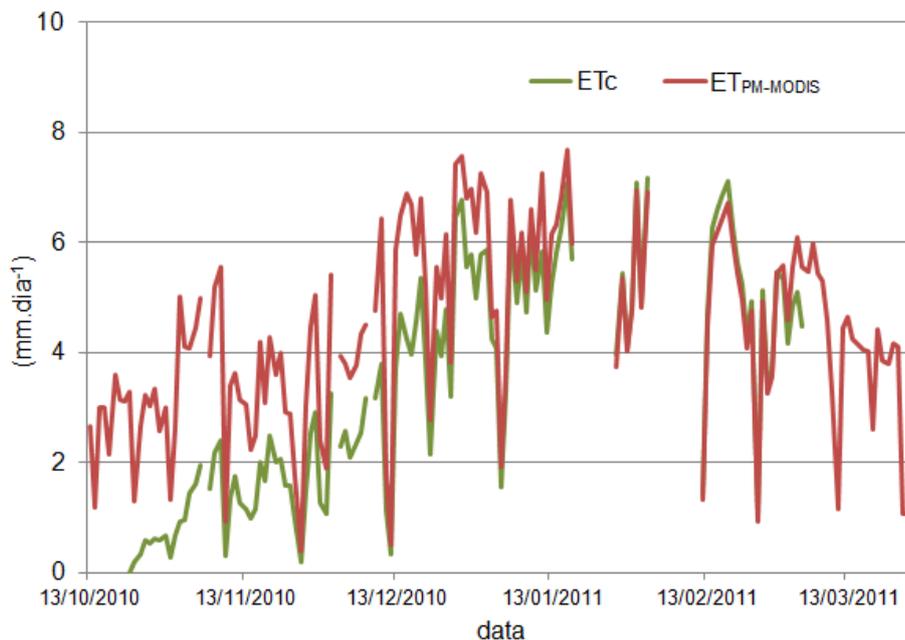


FIGURA 20. Comportamento da estimativa de ET através da ET_c e $ET_{PM-MODIS}$. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

Através da análise do gráfico de dispersão entre $ET_{PM-MODIS}$ e ET_c (Figura 21), observou-se que a maior parte dos pontos estão acima da linha (1:1), significando que a estimativa através da $ET_{PM-MODIS}$ superestima os valores de ET_c . Apesar

dessas diferenças observadas entre as estimativas de ET, o coeficiente de correlação entre as estimativas foi de 0,87, significativo a 1% de probabilidade pelo teste *t-Student*. Através da Figura 22, observamos que o coeficiente de determinação R^2 apresentou um valor significativo de 0,7592.

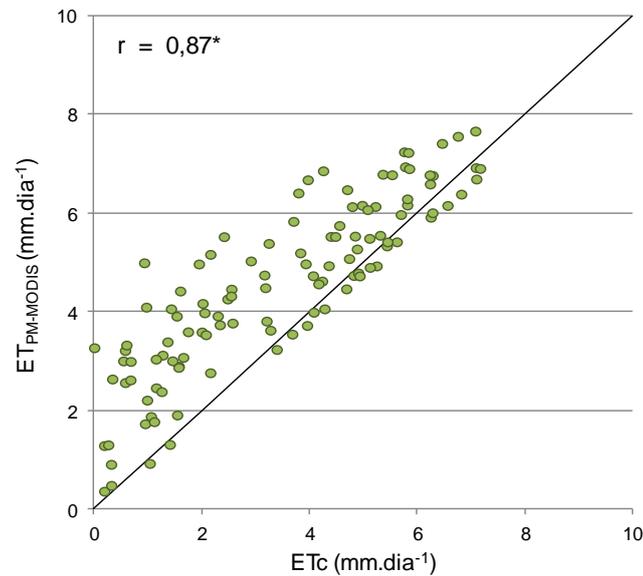


FIGURA 21. Gráfico de dispersão entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ET_c . Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011.

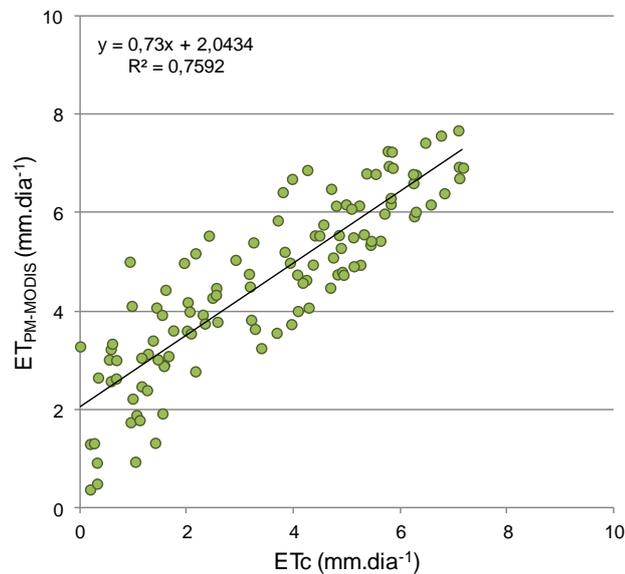


FIGURA 22. Ajuste linear entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ET_c . Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011.

4.3.3 $ET_{PM-MODIS}$ X ET_r

Na Figura 23, verificou-se que no período que se estende de 29 de outubro até 9 de novembro, houve uma inversão das estimativas de ET, sendo que a ET_r apresentou um comportamento contrário a $ET_{PM-MODIS}$. Uma possível hipótese para descrição deste comportamento, pode estar ligada ao fato de que ET_r , estimada através do Método de Covariância dos Vórtices Turbulentos, ser determinada diretamente pelas componentes do vento. Neste período constatou-se que, conforme a Figura 15, a velocidade do vento apresentou seu segundo maior pico.

No restante do período, observou-se que as estimativas de ET_r e $ET_{PM-MODIS}$ apresentaram evolução temporal semelhante, apesar das diferenças.

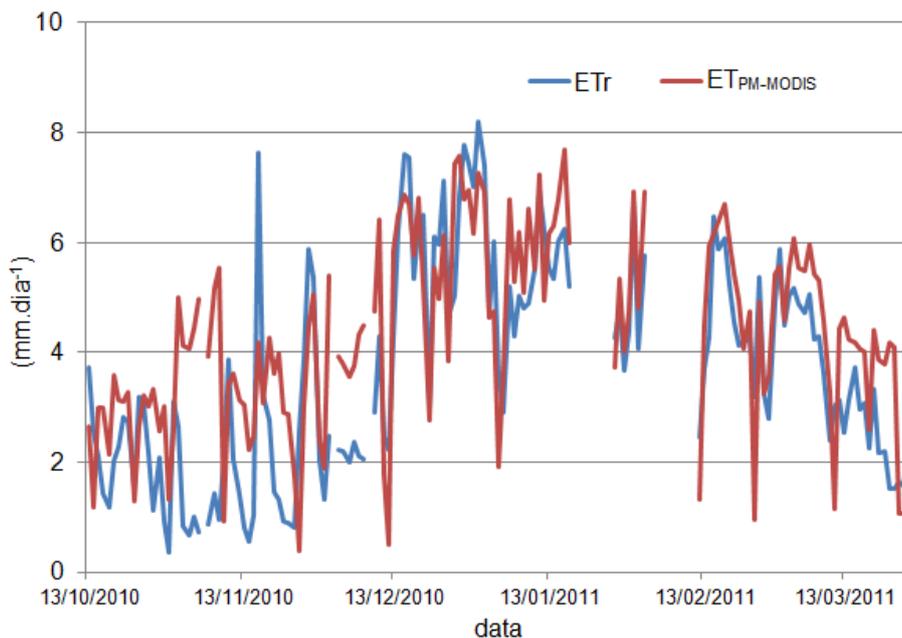


FIGURA 23. Comportamento da estimativa de ET através da ET_r e $ET_{PM-MODIS}$. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

A análise do gráfico de dispersão entre $ET_{PM-MODIS}$ e ET_r (Figura 24), verificou-se que os pontos estão mais afastados da linha (1:1) em relação a Figura 19. No entanto, apesar desta maior dispersão entre as estimativas de ET, o coeficiente de correlação apresentou valor de 0,74, sendo significativo a 1% de probabilidade pelo teste *t-Student*. O coeficiente de determinação apresentou valor significativo de 0,54,

conforme observado na Figura 25. Sendo assim, possível utilização de dados de vegetação provenientes do sensor orbital MODIS para a estimativa de ET como uma alternativa a dados observados em campo.

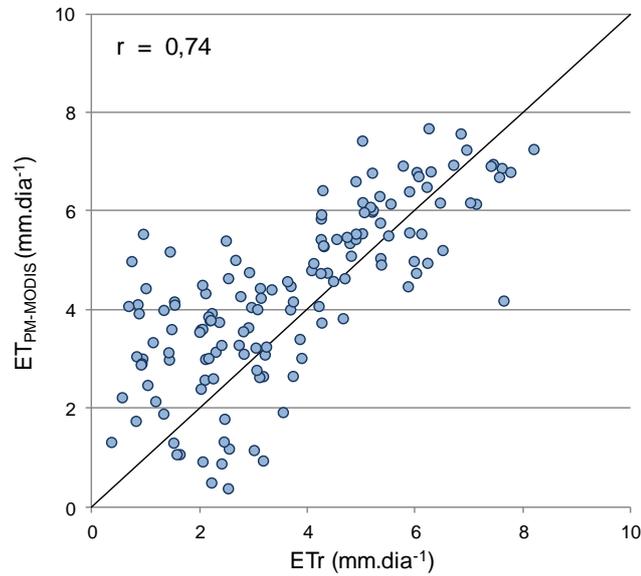


FIGURA 24. Gráfico de dispersão entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ETr . Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

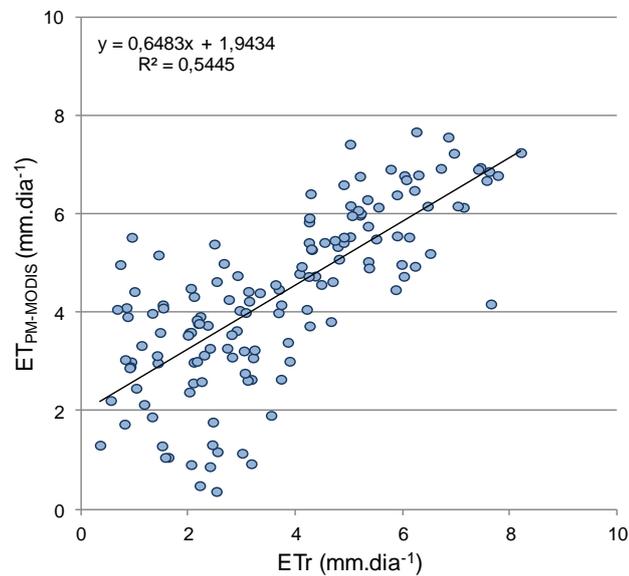


FIGURA 25. Ajuste linear entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ETr . Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.

5. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas neste trabalho, conclui-se que:

O comportamento detalhado das variáveis meteorológicas, no sítio experimental de Cachoeira do Sul, influentes na estimativa de ET, apresentam durante o período de estudo condições climáticas propícias para o desenvolvimento da cultura de arroz irrigado e aumento da ET conforme o esperado.

O IAF obtido a partir de sensoriamento remoto é coerente com o IAF medido em campo. No entanto, a estimativa obtida através de dados espectrais apresenta maiores valores.

A estimativa da altura da cultura através do sensor MODIS, apresenta valores abaixo do encontrado em campo porém, os resultados obtidos são coerentes com o esperado. Entretanto, são necessários ajustes para uma melhor correlação com os dados *in situ*.

O comportamento temporal das estimativas de ET juntamente com o IAF, é possível verificar que pequenos valores de área foliar, resultam em menores valores de ET, e conforme a cultura do arroz desenvolve-se ambos apresentam o mesmo crescimento.

A comparação entre os diferentes resultados de estimativa de ET, obtidos em campo e estimados através de sensoriamento remoto, são satisfatórias. No entanto, os maiores valores obtidos de ET são provenientes do sensor MODIS.

Por fim, conclui-se que a estimativa da ET, a partir de dados de vegetação, obtidos através de técnicas de sensoriamento remoto, se constituem como uma alternativa às estimativas que utilizam dados de vegetação medidos em campo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTO, Ma. C. R., WASSMANN, R., HIRANO, T., MIYATA, A., HATANO, R., KUMAR, A., PADRE, A., AMANTE, M. Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flood and aerobic rice fields in the Philippines. **Agricultural Water Management**, v.98, p. 1417-1430, 2011.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Itália, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.HTM>>. Acesso em: 12 dez. 2011.

ALVES, G. M. **Análise do Modelo Linear de Mistura Espectral aplicado a imagens MODIS para o mapeamento da cultura do arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul**. 2007. 80f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em: Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

ARAÚJO, G.L. *et al.* Desempenho comparativo de métodos para a estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET_o). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.5, n.2, p.84-95, 2011.

ARYA, S. P.; HOLTON, J. **Introduction to Micrometeorology, 2nd edition**. San Diego – California. Academic Press, 2001.

AZAMBUJA, I. H. V.; VERNETTI, F. J.; MAGALHÃES Jr. **Aspectos econômicos da produção do arroz**. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JR., A. M. Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. 899p.

CARMONA, L. C.; BERLATO, M. A. El Niño e La Niña e o rendimento de grãos de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.2, p. 289-294. 2002.

CASANOVA, D.; EPEMA, G. F.; GOUDRIAN, J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. **Field Crops Research**, n.55, p.83-92. 1998.

CHANG, K. W.; SHEN, Y.; LO, J. C. Predicting Rice Yield Using Canopy Reflectance Measured at Booting Stage. **Agronomy Journal**, v.97, n.3, p. 872-878, 2005.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. United States of America: McGraw-Hill, 1988. 572 p.

CLEUGH, H. A. *et al.* Regional Evaporation Estimates from Flux Tower and MODIS Satellite Data. **Remote Sensing of Environment**, n. 106, p. 285-304, 2007.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. Porto Alegre, 2008. 274 p.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira - Grãos Safra 2010/11**. 2011 Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_01_06_08_41_56_boletim_gaos_4o_lev_safra_2010_2011.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2012.

D'ARCO, E. **O uso de geotecnologias para estimativa de área plantada de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul**. 2007. 206f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil**. 2005 Disponível em: <<http://sistemadeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/index.htm>>. Acesso em: 16 jan. 2013.

FRIELD, M. Q.; MCIVER, D. K.; HODGES, J. C. F.; ZHANG, X. Y.; MUCHONEY, D. STRAHLER, A. H.; WOODCOCK, C. E.; GOPAL, S.; SCHNEIDER, A. and COOPER, A. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. **Remote Sensing of Environmental**, v.83, p.287-302, 2002.

GIACOMONI, M. H. **Estimativa de evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia: aplicação no Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. 172f. Dissertação

(Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GOERGEN, G. **Utilização do índice de área foliar obtido por sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Prata**. 2010. 89f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

GOERGEN, G.; ROBERTI, D. R.; GONÇALVES, L. G. G. de. Estimativa da evapotranspiração sobre a Bacia do Prata utilizando climatologia do IAF. **Revista Ciência e Natura**, Universidade Federal de Santa Maria, Volume especial, p. 77-80, 2009.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Banco de Dados. Agricultura. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br> >. Acesso em: 20 jun. 2012.

INMet. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<http://inmet.gov.br>>. Acesso em: 15 mar. 2012.

IRGA. **Instituto Rio Grandense do Arroz**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/uploads/anexos/1364861355Comparativo_Colheita_Quarta_Sem_Mar_13.pdf>. Acesso: 18 fev. 2013.

JENSEN, J. R. Remote sensing of vegetation. In. __. **Remote sensing of the environment, an earth resource perspective**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000. 544 p, cap.10. p. 333-377.

KELLIHER, F. M.; Lenning, R.; Schylze, E. D., 1993. **Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grass-lands**. O ecologia, v.95, p.153-163. Em BRITO, José Ivaldo Barbosa de; Nascimento, Robson de Sousa, 2007. **Modelo de vegetação potencial para a Região Nordeste decorrente da precipitação pluvial**. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052007000300019 acesso em: 30/10/2011 às 14:34. Campinas - SP.

KLERING, E. V. **Avaliação do uso de imagens MODIS na Modelagem Agrometeorológica Espectral de rendimento de arroz irrigado no Rio Grande**

do Sul. 2007. 131f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em: Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KLERING, E. V. Mapeamento da área cultivada e estimativa do rendimento de grãos de arroz irrigado a partir de Modelos Agrometeorológicos Espectrais para o Rio Grande do Sul. 2012. 182f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em: Agrometeorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

KNIPLING, E. B. Physical and psysiological basis for the reflectance visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n.3, p. 155-159, Summer 1970.

KWON, Y. W.; KIM, D. S.; PARK, S. W. Effect to Soil Temperature on the Emergence-Speed of Rice and Barnyardgrasses under Dry Direct-Seeding Conditions. **Korean Journal of Weed Science**, v.16, p81-87, 1996.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. Remote sensing and image interpretation. 4. ed. Madison : University of Wisconsin, 750 p, 1999.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. Remote sensing and image interpretation. 2. ed. New York, John Wiley, 1987. 721p.

MAFFEI, J. C. O arroz: perfil agrícola, armazenamento e conservação. Sagra S.A. Editora e Distribuidora, 1981.

MAGALHÃES Jr. A. M. et al. Aspectos genéticos, morfológicos e de desenvolvimento de plantas de arroz irrigado. In: GOMES e MAFALHÃES Jr. (Organizadores) Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília, DF. Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. 899p.

MEDEIROS, A.T. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e equações empíricas, em Paraipaba, CE. 2002. 120f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MENDONÇA, J.C. *et al.* Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia e Ambiental**, v.7, n.2, p.275-279,2003.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3ª ed. Atual. Ampl. Viçosa: Editora UFV, 2005, 320p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: INPE, 250p. 2001.

MOTA, F.S. da. Influência da radiação solar e do “frio” no período reprodutivo sobre o rendimento do arroz irrigado em Pelotas e Capão do Leão. *Lavoura Arrozeira*, Porto Alegre, v.47, n.413, p.22-23, 1994.

MU, Q., HEINSH, F. A., ZHAO, M., RUNNING, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing Environment**, v.111, p.519-536, 2007.

OLDEMAN, L. R.; SESHU; D. V.; CADY, F. B. Response of rice to weather variables. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE IMPACT OF WEATHER PARAMETERS ON GROWTH AND YIELD OF RICE. 1986, Los Baños. **Weather and Rice, proceedings...** Los Baños: IRRI (International Rice Research Center), 1986 p. 5-39.

OLIVEIRA, M.A.A.; CARVALHO, D. F. Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédica e Campos, estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.2, n.2, p.132-135, 1998.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, v.A193, p. 120-146, 1948.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: AGROPECUÁRIA, 2002.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Piracicaba, 2000. 180 p.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP. Editora Parêntese, 2007.

ROSEMBERG, N. J. **Microclimate: the biological environment**. John Wiley, New York, 1974

RUNDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**, São José dos Campos, SP: Parêntese; 2007. 423 p.

SANTOS, T. V. **Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na Bacia do Jacuí por meio de imagens orbitais**. 2009. 85f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SINGER, J., *et al.*, 2010. Contrasting methods for estimating evapotranspiration in soybean. *Agric. Water Manage.* 98, 157-163, 2010.

SOUSA, C. L.; **Uso de imagens-índice de imagens-proporção para avaliar a quantidade de madeira em povoamentos de *Pinus* SSP**. 1997. 137f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em: Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

STEINMETZ, S.; BRAGA, H. J. Zonmeamento de arroz irrigado por épocas de semeadura agroclimático do arroz irrigado por épocas de semeadura nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.3, p. 229-438, 2001.

SulFlux. **Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas**. Disponível em: < <http://www.sulflux.ufsm.br/sulflux/>>. Acesso em: 5 dez. 2011.

SUYKER, A. E. VERMA, S., Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, n.3, p. 417-427, 2011.

SUYKER, A.E., VERMA, S.B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. *Agric. For. Meteorol.* 149, 443-452, 2009.

TABBAL, D. F.; BOUMAN, B. A. M.; BRUIYAN, S. I.; SIBAYAN, E. B.; SATTAR, M. A. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice: case studies in the Philippines. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.56, n.2, p.93-112, July 2002.

VANE, G.; GOETZ, A. F. H. Terrestrial imaging spectrometry. **Remote Sensing of Environment**, v.24, p.1-29, 1988.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**, Recife: Versão Digital 2, 2006. 463 p.

VESCOVE, H.V.; TURCO, J.E.P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara - SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.713-721, set/dez. 2005.

WANG, Y.; WOODCOCK, C. E., BUERMANN, W.; STENBERG, P.; VOIPIO, P.; SMOLANDER, H.; HAMME, T.; TIAN, Y.; HU, J.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R. B. Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland. **Remote Sensing of Environment**, v.91, p.114-1127, 2004.

WILKE, A. L. D.; ROBERTI, D. R.; WEBER, L. S. Utilização do sensor MODIS para estimativa do arroz irrigado no RS. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2012, Gramado. **Anais...** XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, SBMET, 2012.

YOSHIDA, S. *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños: IRRI, 1981. 269p

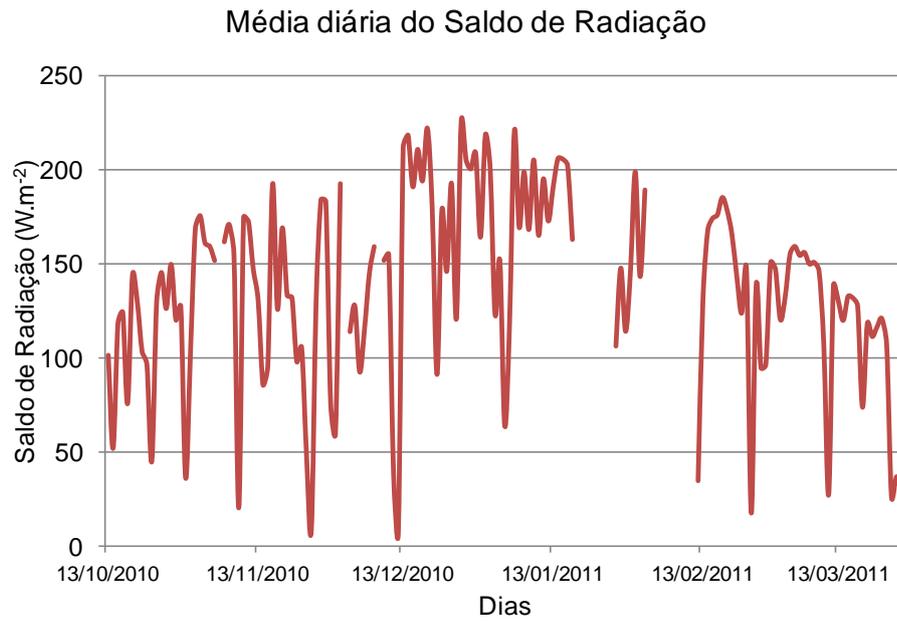
YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: IRRI (International Rice Research Center), 1981. p. 128-147, 213-235. 1981

7. APÊNDICES

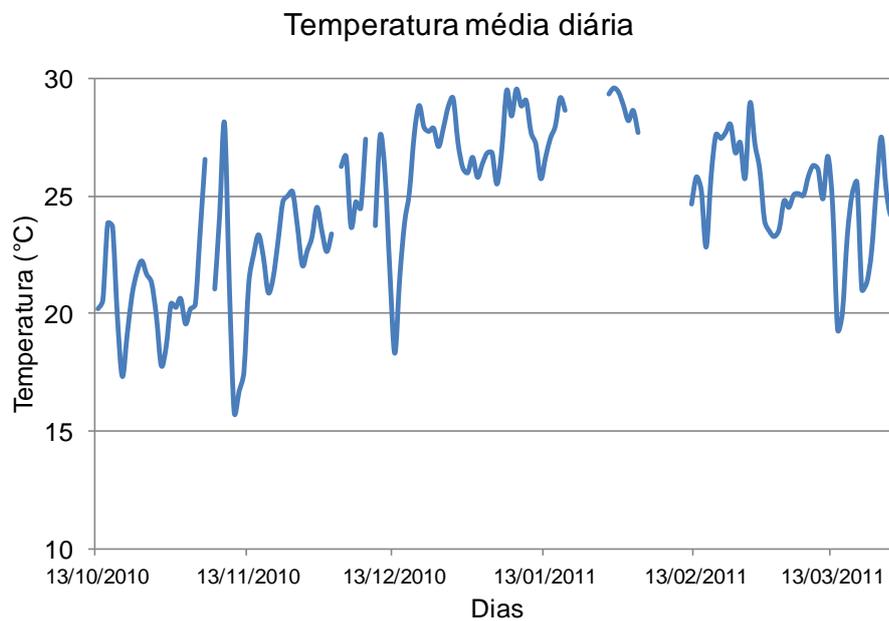
| Mês | Variáveis meteorológicas | | |
|-----------|--------------------------|----------------------|---|
| | Temperatura (°C) | Umidade Relativa (%) | Velocidade do Vento (m.s ⁻¹)* |
| Outubro | 19,0 | 71,4 | 1,48 |
| Novembro | 21,4 | 68,4 | 1,35 |
| Dezembro | 23,7 | 66,1 | 1,16 |
| Janeiro | 24,5 | 69,2 | 1,05 |
| Fevereiro | 24,3 | 72,0 | 1,07 |
| Março | 22,3 | 74,8 | 0,94 |

*Vento a 2 m de altura.

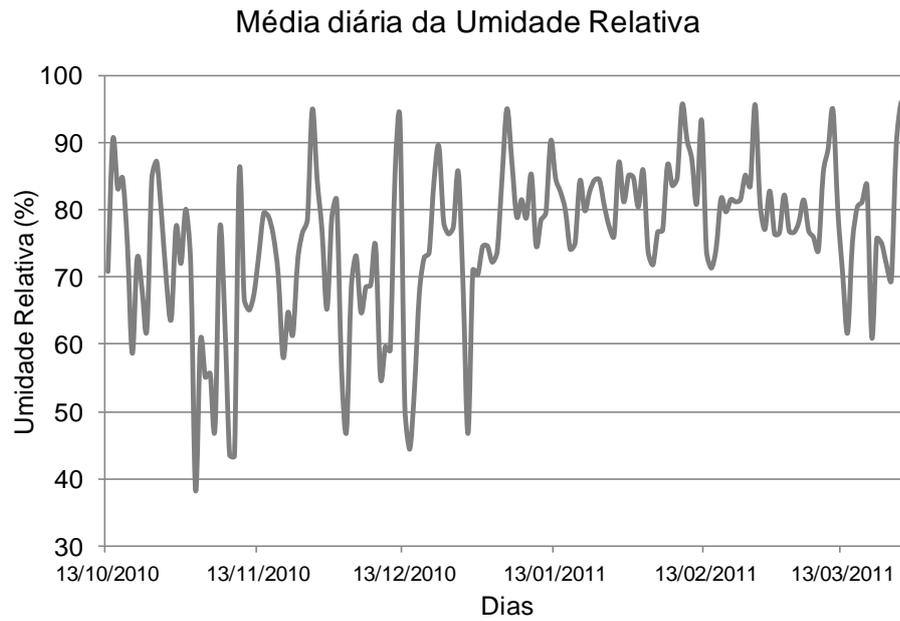
APÊNDICE 1. Normais climatológicas (1961-1990) de temperatura (°C), umidade relativa (%) e velocidade do vento (m.s⁻¹). Período: outubro a março.
Fonte: INMet.



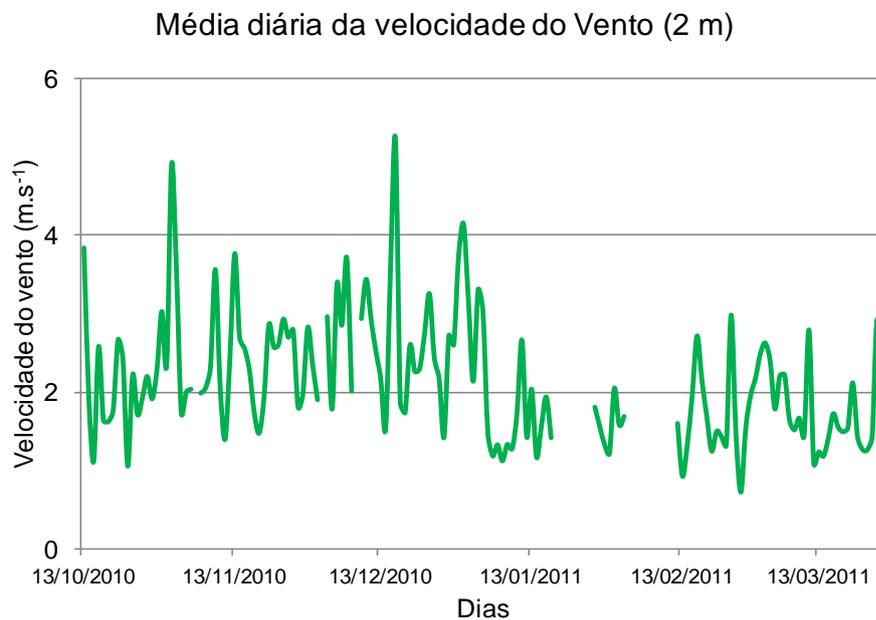
APÊNDICE 2. Média diária do Saldo de Radiação (W.m^{-2}). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.



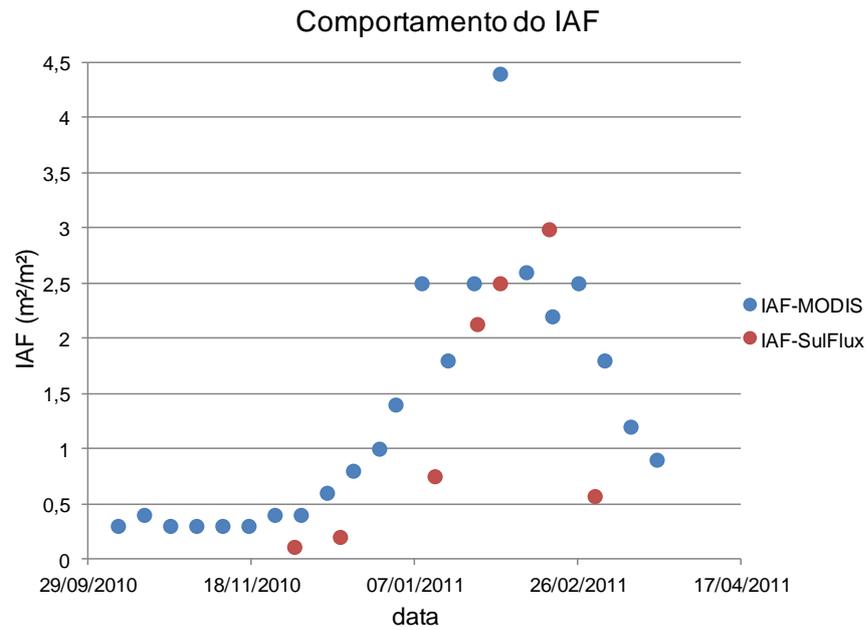
APÊNDICE 3. Temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.



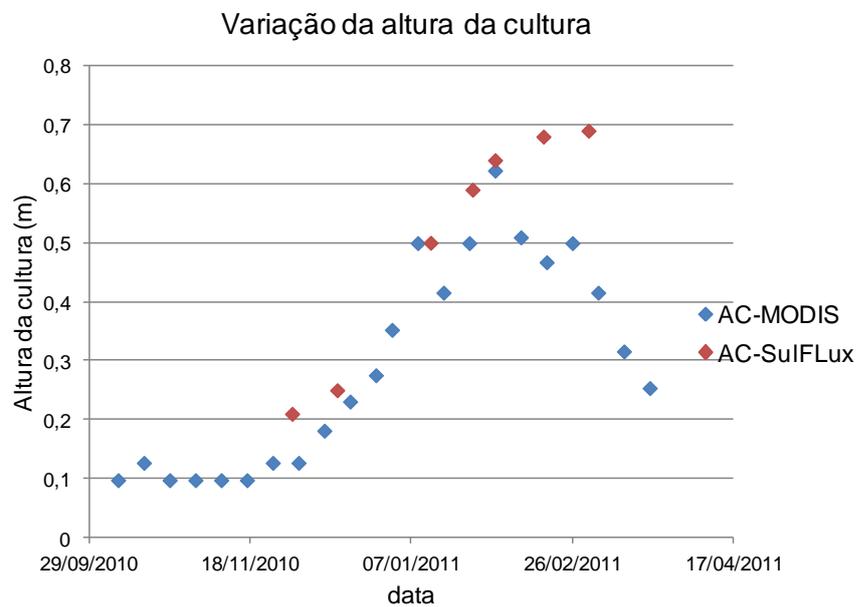
APÊNDICE 4. Média diária da umidade relativa (%). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.



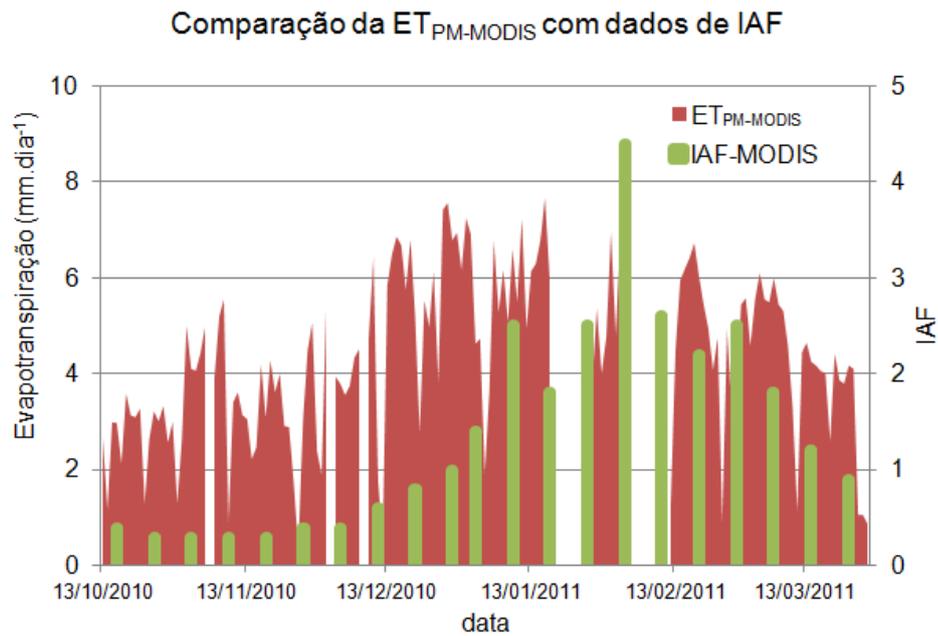
APÊNDICE 5. Média diária da velocidade do Vento (m.s⁻¹). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.



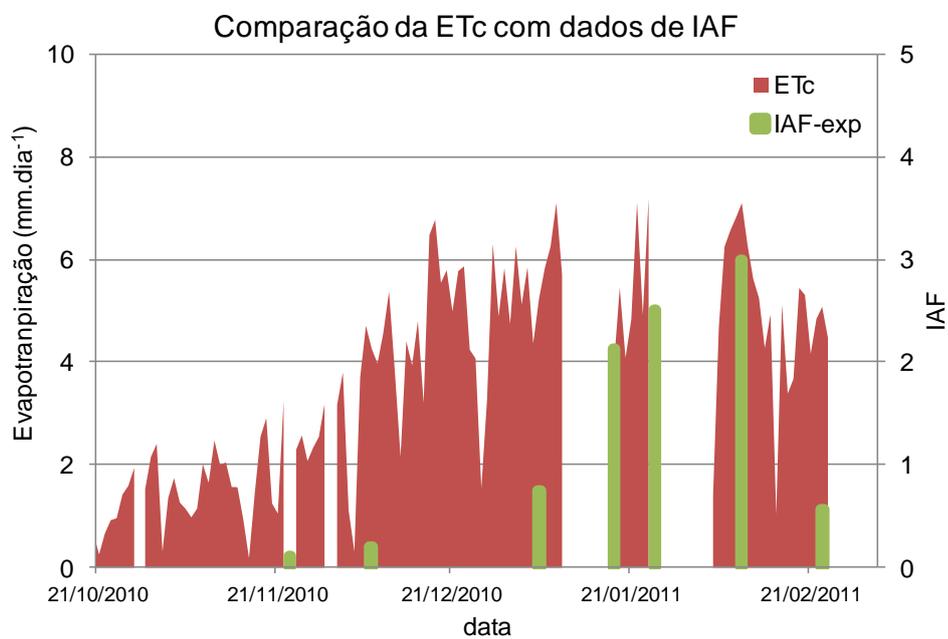
APÊNDICE 6. Comportamento do Índice de Área Foliar ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.



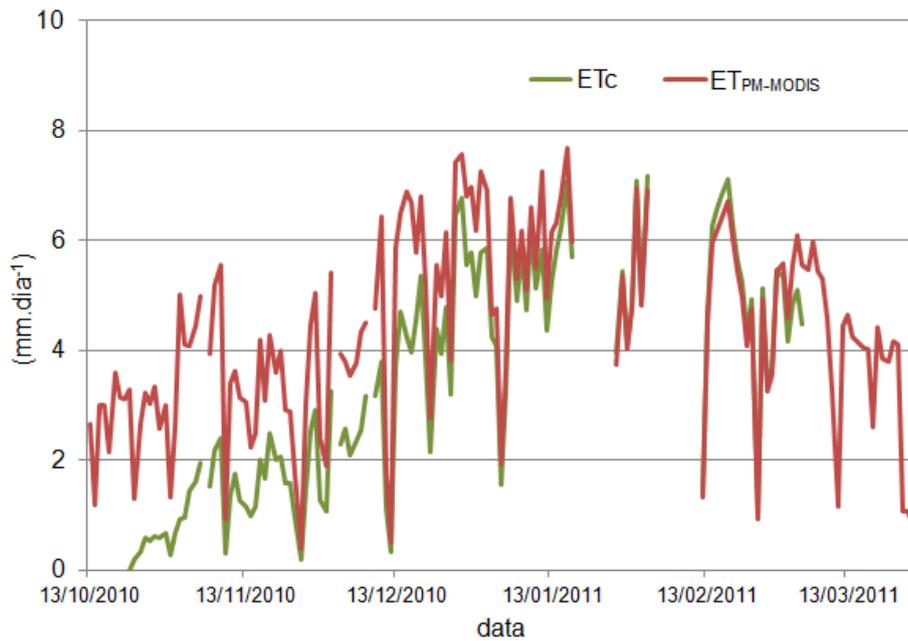
APÊNDICE 7. Variação da altura da cultura (m). Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.



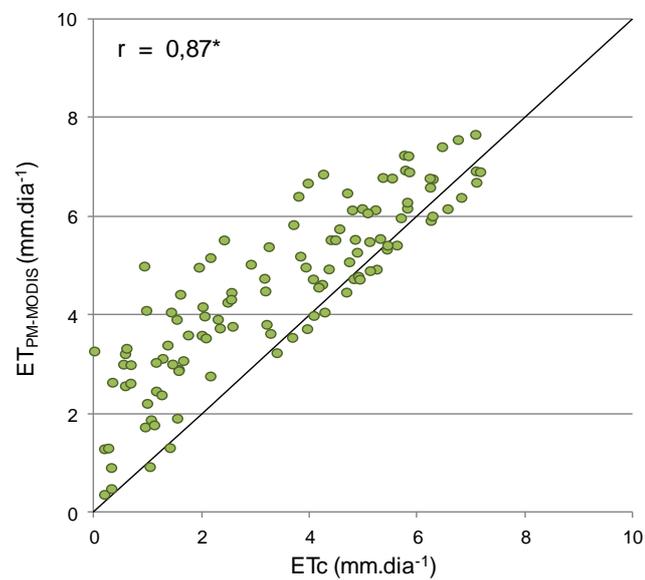
APÊNDICE 8. Comparação da evapotranspiração estimada pela $ET_{PM-MODIS}$ com dados de IAF-MODIS. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.



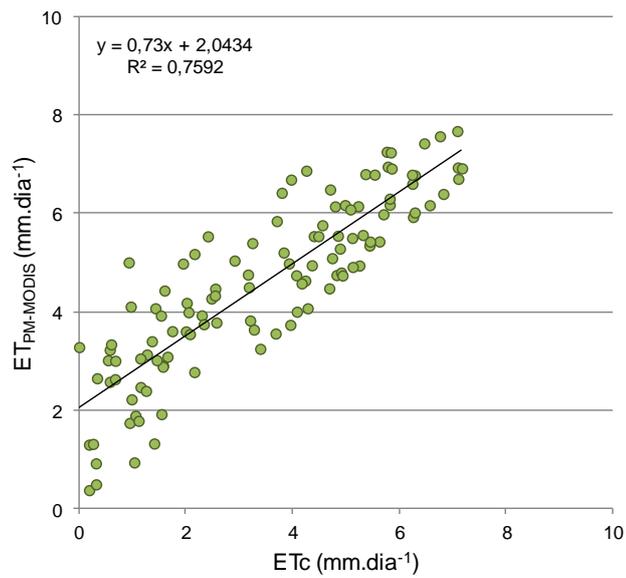
APÊNDICE 9. Comparação da evapotranspiração estimada pela ET_c com dados de IAF experimentais. Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011.



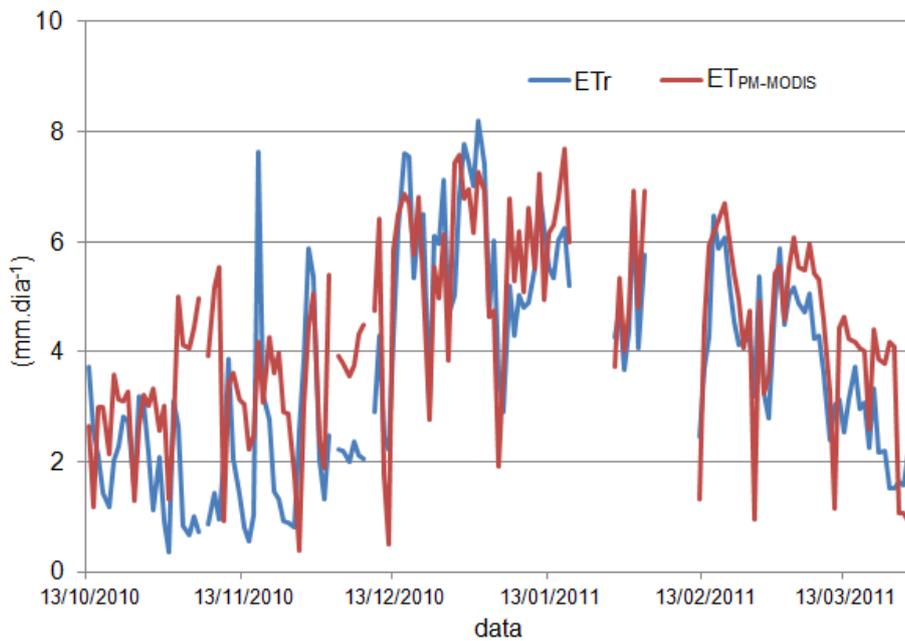
APÊNDICE 10. Comportamento da estimativa de ET através da ET_c e ET_{PM-MODIS}.
Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.



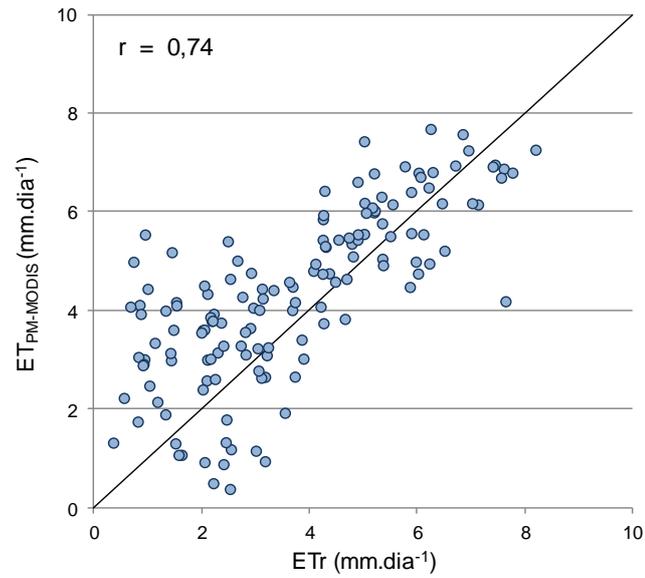
APÊNDICE 11. Gráfico de dispersão entre a ET_{PM-MODIS} e ET_c. Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011.



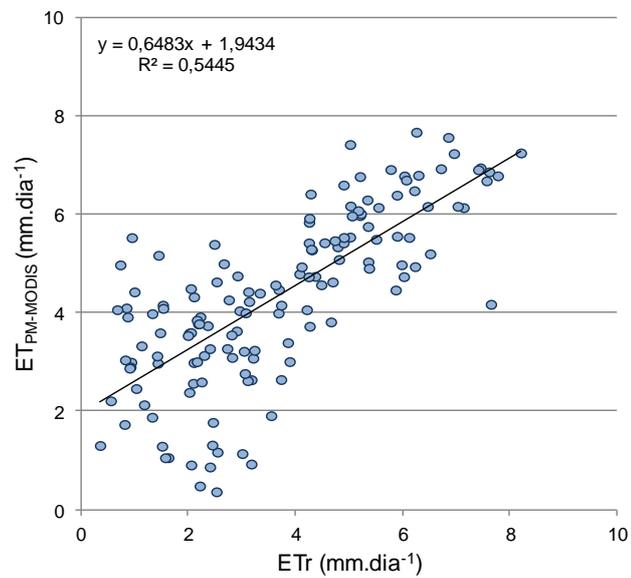
APÊNDICE12. Ajuste linear entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ET_c . Período: 21 de outubro de 2010 até 04 de março de 2011.



APÊNDICE 13. Comportamento da estimativa de ET através da ET_r e $ET_{PM-MODIS}$. Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.



APÊNDICE 14. Gráfico de dispersão entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ETr . Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.



APÊNDICE15. Ajuste linear entre a $ET_{PM-MODIS}$ e ETr . Período: 13 de outubro de 2010 até 27 de março de 2011.