

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**ESTUDO DAS COMPONENTES DO BALANÇO DE
ENERGIA EM UMA CULTURA DE ARROZ
IRRIGADO NO SUL DO BRASIL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Julio César Lopes Sena

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**ESTUDO DAS COMPONENTES DO BALANÇO DE ENERGIA
EM UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO NO SUL DO
BRASIL**

Julio César Lopes Sena

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em
Micrometeorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Meteorologia

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Débora Regina Roberti
Co-orientador: Prof. Dr. Hans Rogério Zimmermann

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia**

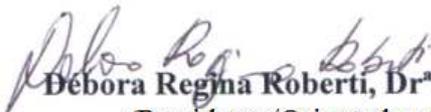
**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado**

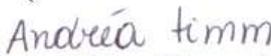
**ESTUDO DAS COMPONENTES DO BALANÇO DE ENERGIA
EM UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO NO SUL DO
BRASIL**

elaborado por
Julio Cesar Lopes Sena

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Meteorologia

COMISSÃO EXAMINADORA


Débora Regina Roberti, Dr^a. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)


Andréa Ucker Timm, Dr^a. (FSG)


Anderson Spohr Nedel, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 31 de agosto de 2012.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que fizeram parte desta caminhada ao longo de meus estudos e que de alguma forma contribuíram para minha formação tanto profissional como pessoal. Em especial agradeço aqueles que me auxiliaram e ajudaram em todas as horas.

Agradeço a professora Débora Roberti, minha orientadora, pela paciência e ajuda na elaboração de meu estudo, além de sua compreensão e amizade.

Ao professor Hans Zimmermann, meu co-orientador, pela sua grande contribuição de conhecimentos que me foram úteis no desenvolvimento de meu trabalho.

Ao mestre Cláudio, por compartilhar de seu conhecimento na área experimental e incentivo no desenvolvimento e melhora do laboratório.

A universidade Federal de Santa Maria pela formação acadêmica e pela presente titulação e a CAPES.

A minha mãe, pela educação e contribuição para minha formação como pessoa. A meu pai e minha irmã pelo incentivo e ajuda.

A Cibele, que esteve do meu lado nos momentos bons e difíceis desta caminhada. Também agradeço aos demais colegas Pablo, Joel, Marcelo, Josué e Janaína.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria

ESTUDO DAS COMPONENTES DO BALANÇO DE ENERGIA EM UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO NO SUL DO BRASIL

AUTOR: JULIO CESAR LOPES SENA

ORIENTADOR: DÉBORA REGINA ROBERTI

CO-ORIENTADOR: HANS ROGÉRIO ZIMERMANN

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 31 de agosto de 2012.

Esta dissertação de mestrado apresenta um estudo realizado no sítio experimental de Cachoeira do Sul-RS, Brasil. O objetivo deste trabalho foi de estimar as componentes do Fechamento do Balanço de Energia (FBE) na superfície de uma lavoura de arroz irrigado. A pesquisa foi dividida em três períodos: I-solo seco, em que o solo apresentava-se não irrigado e com vegetação baixa, restante da última colheita do arroz, II - solo irrigado, em que a superfície estava sendo preparada para a plantação de arroz pré-germinado e período III - solo irrigado com o arroz já plantado e em fase reprodutiva. Também foram realizadas medidas do índice de área foliar, altura do arroz e acompanhamento do nível de água sobre a lavoura. Medidas de temperatura na lâmina de água sobre a lavoura foram utilizadas para estimar o fluxo de energia através desta objetivando melhorar o FBE. Para a aquisição de dados utilizou-se sensores de temperatura no solo, fluxímetro de solo, sensor de radiação líquida, sensor de direção e velocidade do vento e analisador de gás por infravermelho de caminho aberto. Os resultados mostraram que a soma das componentes do FBE, não equivale a radiação líquida disponível na superfície e que o desequilíbrio energético é influenciado pelo tipo de cobertura da superfície.

Palavras-Chave: Balanço de Energia. Fluxo de Calor. Radiação Líquida.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria

STUDY OF THE ENERGY BALANCE COMPONENTS IN AN IRRIGATED RICE CULTURE IN SOUTHERN BRAZIL

AUTHOR: JULIO CESAR LOPES SENA

ADVISER: DÉBORA REGINA ROBERTI

CO-ADVISER: HANS ROGÉRIO ZIMERMANN

Local and Date: Santa Maria, August 31, 2012.

This dissertation presents a study on the experimental site of Cachoeira do Sul-RS, Brazil. The objective of this study was to estimate the components of the Energy Balance Closure on the surface of a rice paddy field. The research was divided into three periods: I-dry soil, not irrigated and low vegetation, remaining from the last rice harvest, II - irrigated soil in which the area was being prepared for planting pre-germinated rice, and period III - irrigated soil already planted with rice and at reproductive phase. Also, we performed measurements of leaf area index, rice height and monitoring of the water level on the field. Temperature measurements at the water level on the crop were used to estimate the energy flow through this order to improve the EBC. For data acquisition, were used temperature sensors in the soil, heat flux plate, net radiation sensor, wind speed and direction and infrared open path gas analyzer. The results showed that the sum of the components Energy Balance Closure are not equivalent to the available energy in the surface, and the surface energy imbalance is influenced by the surface coverage.

Keywords: Energy Balance. Heat Flow. Net Radiation.

LISTA DE SIMBOLOS

- A - Área.
 c - Calor específico.
 c_p - Calor específico da água a pressão constante.
 F_a - Fluxo de energia na água.
 G - Fluxo de calor no solo.
 H - Fluxo de calor sensível.
 R_n - Fluxo de radiação líquida.
 Le - Fluxo de calor latente.
 m - Massa.
 S - Energia armazenada.
 Q_s - Calor sensível.
 Q - Energia térmica
 Q_λ - Calor de transformação.
 R - Fluxo de energia residual.
 T - Temperatura.
 K - Condutividade térmica.
 λ - Calor latente.
 ρ - Coeficiente de correlação.
 μ_v - Densidade volumétrica.
 σ - Constante de Stefan-Boltzmann.

Lista de Figuras

Figura 2.1 Modelo de uma onda eletromagnética.	16
Figura 2.2- Condução térmica entre dois sistemas <i>A</i> e <i>B</i> de temperaturas diferentes, que estão separados por um meio condutor qualquer de espessura Δx	19
Figura 2.3- Condução e armazenamento de energia. (Adaptado de Oke 1981).....	21
Figura 3.1 – Sítio experimental de Cachoeira do Sul.....	26
Figura 3.2 – Imagem da torre micrometeorológica instalada entre duas parcelas da lavoura..	27
Figura 3.3 – (a) Realização da medida de área foliar com o aparelho Licor LI-3000A. (b) Aparelho utilizado na medição de área foliar, Licor LI-3000A. 28	
Figura 3.5 – Esquema de montagem do sistema para medir a temperatura da lâmina d’água sobre a lavoura em dois níveis.....	29
Figura 4.1 – Condições ambientais referentes ao período de solo seco (I) para: (a) temperatura, (b) radiação global e (c) magnitude do vento.....	32
Figura 4.2 – Condições ambientais referentes ao período de solo irrigado (II) para: (a) temperatura, (b) radiação global e (c) magnitude do vento.....	33
Figura 4.3 – Condições ambientais referentes ao período de solo irrigado com arroz (III) para: (a) temperatura, (b) radiação global e (c) magnitude do vento	34
Figura 4.4 – Comportamento diurno das componentes do FBE no período de pousio (período D).	36
Figura 4.5 - Comportamento diurno das componentes do FBE no período de solo irrigado (período II).....	36
Figura 4.6 - Comportamento diurno das componentes do FBE no período de solo irrigado com arroz (período III).	37
Figura 4.7 – Comparação realizada para 8 dias de medidas entre os sensores de temperatura utilizados para estimar o fluxo de energia na lâmina de água.	39
Figura 4.8 – Ciclo diário do fluxo de energia estimado na lâmina de água.	39
Figura 4.9 – Comparação entre radiação líquida e o fechamento no balanço de energia para o período I (solo seco)	40
Figura 4.10 – Comparação entre radiação líquida e o fechamento no balanço de energia para o período II (solo seco).....	41
Figura 4.11 – Fechamento do balanço de energia para o período III (irrigado e com arroz)...	41

Figura 4.12 – Comparação do ciclo diário do fluxo de energia residual para o primeiro período R1, segundo R2 e terceiro R3.....	42
Figura 4.13 – Gráfico de espalhamento do FBE em função de R_n para o primeiro período (a), segundo período (b).e terceiro período (c).	43
Figura 4.14- Diagrama de espalhamento para o período III com adição do fluxo de calor na água no FBE.	44

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Imagens de satélite referente aos dias de solo seco	49
Anexo B – Imagens de satélite referente aos dias de solo irrigado.....	51
Anexo C – Imagens de satélite referente aos dias de solo irrigado e com Arroz	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 A Camada Limite Planetária.....	14
2.1.1 Camada Limite Convectiva	15
2.1.2 Camada Limite Estável.....	15
2.2 Energia Térmica	16
2.2.1 Transferência de Energia Térmica Para o Solo e Armazenamento	20
2.2.2 Calor Sensível e Calor Latente	21
2.3 Balanço de Energia na Superfície.....	22
2.3.1 Fluxo turbulento - Método Eddy Covariance	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 Sítio Experimental	25
3.2 Medidas Biofísicas	28
3.3 Medidas na lamina d'água	29
4 RESULTADOS	31
4.1 Condições Ambientais	31
4.2 resultados Biofísicos.....	35
4.3 Componentes do Balanço de Energia.....	35
4.4 Energia na Lâmina d'água	38
4.5 Fechamento do Balanço de Energia	40
5 CONCLUSÕES	45
6. Bibliografia	46

1. INTRODUÇÃO

Os processos de transferência de energia e massa no sistema Terra-Atmosfera (T-A) são auxiliados pela turbulência atmosférica. Nesse sistema, o fluxo líquido vertical de energia pode ser dividido em fluxo de calor sensível (H), responsável pelo aquecimento da atmosfera e da superfície da Terra; fluxo de energia para a mudança de estado físico da água, conhecido com fluxo de calor latente (Le), e fluxo de energia para as camadas internas da superfície conhecida como fluxo de calor no solo (G). O transporte dessas propriedades pela turbulência atmosférica também ocorrem horizontalmente, contudo, com menor eficiência que os verticais.

A soma dos fluxos de energia transferidos verticalmente no sistema T-A é equivalente à energia líquida por unidade de área e de tempo disponível na superfície, conhecida como saldo de radiação ou radiação líquida, tratada simbolicamente como Rn . Quando se compara a soma dos fluxos de energia (H , Le e G) com o fluxo líquido de energia Rn na superfície medido de forma direta, teoricamente, se obtém o Fechamento do Balanço de Energia, tratado em diante como FBE, o qual é discutido posteriormente na sua forma matemática. Segundo Foken (2006a) o FBE não pode ser obtido com dados experimentais, mas é possível estimá-lo.

O método para a obtenção do FBE na superfície é baseado no princípio da conservação de energia (ARYA, 1998; RAMIREZ et al., 2010). O principal método utilizado para obtenção balanço energético na superfície é a técnica *Eddy Covariance*, a qual será discutida posteriormente. Estudos relacionados a este tema permitem, entre outros fatores, avaliar as alterações no microclima da vegetação, além de dimensionar as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera (FONTANA et al., 1991). Este método é utilizado nos estudos de clima, modelagem de tempo, eficiência do uso de água pelas plantas, interações entre a superfície e a atmosfera e trocas de carbono no sistema T-A (RAMIREZ et al., 2010).

Quando são utilizados os dados experimentais de fluxo de energia, necessários para a obtenção do FBE, surge uma nova variável, conhecida na literatura como fluxo de energia residual R , cuja magnitude representa o quanto de energia disponível no sistema T-A está faltando para o FBE se igualar a Rn , isto é, o quanto de energia não está sendo medida para somar-se aos outros termos: H , Le e G . Para Leuning et al. (2012) o não fechamento do Balanço de Energia é uma violação das leis de conservação da energia. Existem vários

estudos relacionados ao FBE na superfície em diferentes ecossistemas, objetivando em sua maioria obter o melhor FBE (GALVANI e ESCOBEDO, 2001; MEYRES E HOLLINGER, 2004; RAMIREZ et al., 2010; KINDISTON et al., 2010; TIMM, 2011; CAVA. et al., 2008; FOKEN, 2006a; FOKEN et al., 2006b).

Galvani e Escobedo (2001) estudaram as componentes do FBE e o saldo de radiação R_n em uma cultura protegida de pepino no estado de São Paulo. Seus estudos mostraram que o fluxo de energia predominante na cultura é o Le . Além disso, as componentes do balanço de energia apresentam valores mais consistentes em níveis próximos ao dossel.

Meyers e Hollinger (2004) estudaram o FBE em uma plantação de milho e soja no centro-oeste dos Estados Unidos da América. Segundo eles os problemas de não FBE foram associados ao armazenamento de energia no dossel e a energia utilizada para a realização da fotossíntese da vegetação. Os fluxos de energia armazenados no dossel e na vegetação foram estimados e somados ao FBE. Com os novos resultados obteve-se uma melhora no saldo de energia de 14% para na cultura de milho e de 8% para a soja. Também em uma cultura de rotação de milho e soja, Ramirez et al. (2010) estudaram o Balanço de Energia no Centro-oeste dos Estados Unidos em um período de quatro anos. Dentre suas conclusões, uma delas é que os fluxos turbulentos de calor sensível e latente são alterados ao longo do desenvolvimento do dossel.

Kinston et al. (2010) apontou como possível causa do não FBE o sistema de medição, bem como sensores utilizados e posicionamento da torre micrometeorológica. Os alvos desse estudo foram dois sítios caracterizados por florestas de araucária.

Pesquisas sobre o FBE em vegetação rasa no Sul da Itália realizadas por Cava et al. (2008) associaram o não Fechamento no Balanço de Energia a superestimação da técnica *Eddy Covariance*. Além disso, foram indicados outros fatores como: tipo de cobertura da superfície, posicionamento dos sensores utilizados na obtenção dos fluxos turbulentos, armazenamento de energia no solo e no dossel, entre outros.

Foken et al. (2006b) e Cava et al. (2008) sugerem que o termo R , está relacionado com os métodos de obtenção dos dados, sensibilidade dos sensores utilizados, calibração dos instrumentos, heterogeneidade da superfície e armazenamento no solo e na vegetação. Ramirez et al. (2009), compraram as medidas obtidas numa cultura de soja e uma de milho e concluíram que o FBE é afetado pela presença do tipo de vegetação e que os resultados variam de acordo com sua estrutura aerodinâmica, isto é, os resultados variam de acordo com o tipo de vegetação.

Especificamente, em uma cultura de arroz (*Oryza sativa*) Timm (2011) discute que o não fechamento no balanço energético neste tipo de cultura, quando irrigada por inundação é maior de forma que o não fechamento pode estar relacionado com a energia armazenada na lâmina d'água acima do solo utilizada neste tipo de cultivo.

Comin et al. (2009) analisaram o comportamento do FBE em uma cultura de arroz irrigado no Sul do Brasil. Seus resultados mostram uma diferença no FBE de 11,7% entre o período em que o solo se encontrava seco e o período de solo irrigado

Em ecossistemas de cultura irrigada, os valores de R são relativamente elevados em relação ao período de solo não irrigado como mostram os trabalhos de Timm (2011) e Sena et al. (2011). Alberto et al. (2011) mostraram que na cultura por irrigação, o fluxo médio de calor sensível é menor que a cultura aeróbica, e que o fluxo de calor latente médio é maior na cultura irrigada. A inundação de regiões de plantação de arroz afeta as componentes do balanço de energia em relação às regiões não alagadas somente em determinadas etapas do crescimento do arroz, como mostra o trabalho de Lin et al. (2007).

Nesta dissertação é feita uma análise do comportamento FBE em uma lavoura de arroz irrigado por inundação localizada no município de Cachoeira do Sul-RS, Brasil. O objetivo do trabalho foi de comparar as componentes do FBE para diferentes condições da superfície local, descritas a diante, e determinar quanto do fluxo de energia na lâmina d'água utilizada para irrigação da lavoura pode influenciar no FBE para esta região.

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos: no capítulo 1 é realizada a introdução e os objetivos do trabalho realizado, no capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica necessárias para compreensão do estudo. O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada na realização deste trabalho. O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e recomendações de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A Camada Limite Planetária

O espaço compreendido entre superfície terrestre e a altura até onde os fenômenos atmosféricos são influenciados pela presença da superfície terrestre é denominado Camada Limite Planetária (CLP). Nessa camada ocorre grande parte da atividade biológica do planeta. A interação entre a superfície e a atmosfera é restrita a porção denominada Troposfera (porção mais baixa da atmosfera terrestre), particularmente caracterizada pelos processos turbulentos, proveniente do movimento relativo da atmosfera em relação à superfície rugosa e rígida da Terra.

Os processos turbulentos são responsáveis pela mistura, trocas de massa, energia e momentum na CLP (ARYA,1998). Devido à eficiente transferência dessas propriedades, a turbulência na CLP tem a função de moderar o microclima na região próxima à superfície. O transporte turbulento de momentum entre a superfície e a atmosfera é de grande importância, pois a superfície terrestre atua como um absorvedor de momentum da atmosfera devido a sua rugosidade (ARYA, 1998).

Durante o dia, quando a superfície terrestre é aquecida pela radiação solar, há uma ascendente transferência de energia térmica para as regiões superiores da atmosfera (processo de convecção) que favorece o aumento da profundidade da CLP. A profundidade da CLP dependendo da ocasião pode alcançar entre 1 e 2 Km de espessura. Devido os movimentos ascendentes do ar, consequentes do aquecimento da superfície pela radiação solar, há um transporte de energia térmica e de massa para a CLP por processos de turbulência (OKE, 1987), logo o forçante térmico é o maior responsável pela variação da altura da CLP.

No início da noite, em consequência da mudança no gradiente de temperatura, ocorre uma inversão no transporte das propriedades atmosféricas, resultando na redução de sua altura. O estágio assumido pela CLP durante seu ciclo diário devido às mudanças no gradiente vertical de temperatura permite que ela seja caracterizada quanto a sua estrutura, de modo que suas etapas sejam distinguidas em: Camada Limite Convectiva, Camada Limite Estável e Camada Limite Residual. A camada da atmosfera que está em contato com a superfície é denominada Camada Limite Superficial

2.1.1 Camada Limite Convectiva

A Camada Limite Convectiva (CLC) é caracterizada pela sua instabilidade, isto é ao longo de um ciclo diário ela passa por constantes alterações em sua estrutura. Nas primeiras horas do dia, a superfície começa a absorver a luz solar e conseqüentemente se aquece. O aumento na temperatura da superfície dá início aos processos de convecção, que favorecem a mistura do ar, transportando energia e massa entre o ar próximo à superfície e o topo da CLP. Esse transporte de energia térmica e massa é mais significativo na direção vertical, partindo da superfície para os níveis mais elevados da CLP durante o dia e em direção da superfície durante a noite.

Na altura máxima da CLC, há uma inversão no perfil de temperatura, funcionando como uma espécie de “tampão” que atua como barreira às correntes ascendentes de ar que partem da superfície aquecida. Esta camada é conhecida como Zona de Entranhamento (ZN). Desse modo, a duração da CLC se estende até o por do Sol, quando o processo de transporte vertical reduz sua intensidade devido o resfriamento da superfície. Como esta camada é diretamente caracterizada pela turbulência térmica, sua altura máxima ocorre durante a tarde (SHAW 1977 apud GASPARETTO, 2011).

2.1.2 Camada Limite Estável

Com a redução de luz solar sobre a superfície, a CLC desaparece com a redução da convecção gerada durante o dia. Neste período, ocorre então, uma inversão no gradiente vertical de temperatura e as forçantes mecânicas responsáveis pela turbulência são reduzidas dando início à formação de uma camada próxima à superfície denominada Camada Limite Estável (CLE). Esta camada adquire altura inferior a CLC e apresenta-se bem estável com pouca turbulência e profundidade em torno de 100 *m* (OKE, 1987). Logo acima da CLE, o que restou da CLC recebe o nome de camada residual.

2.2 Energia Térmica

O termo energia pode ser descrito como uma propriedade da matéria e, o mais importante é que energia pode transformar-se de uma forma em outra, ser armazenada sob a forma de energia potencial gravitacional, cinética, elástica, térmica e elétrica entre outras. A energia térmica, por exemplo, pode ser transportada de um local para outro por três processos principais: convecção, radiação e condução. Esses processos de transferência de energia térmica ocorrem exclusivamente devido à diferença de temperatura ΔT entre dois sistemas e ocorre até que ambos atinjam o equilíbrio térmico. A unidade de energia no SI é o Joule (J).

O processo de transferência de energia térmica por convecção ocorre exclusivamente nos fluidos. Num gás, por exemplo, ele é transferido pelas colisões diretas entre as suas moléculas. As moléculas do gás com maior energia cinética média possuem maior temperatura e, portanto, cedem energia para as moléculas de menor energia cinética média. A convecção se dá exclusivamente pelo transporte massa. Na atmosfera terrestre este processo tem papel fundamental nas mudanças de clima do planeta, de modo que energia e massa são transportadas por parcelas de ar de um local para outro. Esse transporte pode ser livre ou forçado. A convecção livre ocorre quando o processo é natural, devido apenas à diferença de densidade, e forçado devido à fatores mecânicos como a turbulência.

Outra forma na qual a energia térmica pode ser transferida por radiação, em que ela é transportada por meio de ondas eletromagnéticas, cujo modelo é representado na figura 2.1.

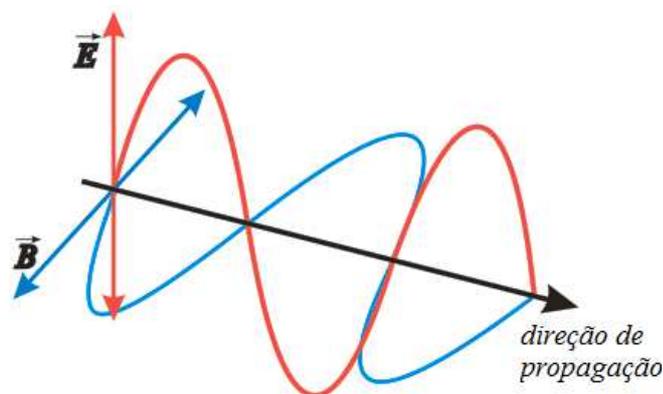


Figura 2.1 Modelo de uma onda eletromagnética.

Essas ondas resultam numa configuração de campos elétricos e magnéticos que oscilam em fase perpendicularmente entre si e à direção de propagação (CROWEL, 1999) com velocidade igual a da luz no vácuo. Ondas eletromagnéticas são geradas a partir de cargas elétricas oscilantes (SERWAY e JEWETT, 2003) e não necessitam de um meio material para sua propagação. Tais ondas são diferenciadas quanto à frequência ou comprimento da onda. O olho humano, por exemplo, é sensível a faixa do espectro visível, numa faixa aproximada de comprimentos de onda que vão de $0,4 \times 10^{-6}$ m a $0,8 \times 10^{-6}$ m.

No processo de aquecimento da superfície terrestre ocorre uma conversão de radiação de onda curta recebida pelo Sol em radiação de onda longa. Neste contexto a atmosfera se comporta como um meio transparente a passagem e ondas curta e opaca à radiação de onda longa. No topo da atmosfera terrestre, a quantidade de radiação que chega do Sol é cerca de 1340 W/m^2 (SERWAY e JEWETT, 2003).

A radiação emitida por um corpo devido à sua temperatura é chamada de radiação térmica (EISBER e RESNICK, 1985; HALLIDAY et al., 2002) e a taxa com que um corpo emite tal energia depende da área superficial do corpo e da quarta potência de sua temperatura absoluta. Este resultado é conhecido como a Lei de Stefan-Boltzmann e pode assumir a seguinte forma.

$$E = \varepsilon \sigma AT^4 \quad (2.1)$$

em que os termos ε , σ , A e T são respectivamente: emissividade do corpo (fração que varia entre 0 e 1 dependendo da composição da superfície emissora), a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor no Sistema Internacional de Unidades (SI) é $5,7603 \text{ W/m}^2\text{K}^4$, área do corpo e temperatura absoluta. Um corpo idealizado com emissividade igual a 1, recebe o nome de radiador de corpo negro.

Se um corpo emite mais radiação que seu ambiente, então ele está se resfriando, por outro lado, se ele absorve mais radiação que emite ele está elevando sua temperatura. Quando as taxas de emissão e absorção forem iguais o corpo estará em equilíbrio térmico com o ambiente ao seu redor. Se um objeto está a uma temperatura T , e seu ambiente a uma temperatura T_0 , a taxa de ganho ou perda de energia por radiação térmica será dado por:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \sigma A \varepsilon (T^4 - T_0^4) \quad (2.2)$$

A condução térmica ocorre geralmente em meios sólidos, e é realizada por meio das interações entre moléculas, átomos ou elétrons devido às suas energias cinéticas médias de vibração e não pelo transporte de matéria. Aquecendo uma barra metálica, por exemplo, em uma de suas extremidades, as moléculas da região aquecida adquirem maior energia cinética de vibração e por meio de suas agitações, transferem energia ao longo da barra até que o equilíbrio térmico se estabeleça. Nesse processo, conforme as partículas recebem energia, suas amplitudes de vibração aumentam cada vez mais, possibilitando que parte da energia adquirida seja transferida para outras partículas do material por meio das interações.

Em alguns materiais, como metais, a condução pode ser auxiliada pela presença de elétrons livres que recebem e liberam energia térmica por meio de colisões com os átomos do material. Esses elétrons também são responsáveis pela transferência de energia elétrica, logo bons condutores elétricos são bons condutores térmicos (EISBERT e RESNICK, 1985). Nesse sentido a atmosfera pode ser vista como um mau condutor de energia por causa da grande separação entre as partículas dos gases. A taxa com que a energia térmica se transmite na condução depende da natureza do material ou substância condutora aquecida.

A taxa com que uma quantidade de energia térmica Q flui através de um meio é proporcional à área da secção transversal do meio condutor, a diferença de temperatura entre os setores e é inversamente proporcional à espessura Δx do meio (Figura 2.2). Isto é:

$$\frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.3)$$

Em um arranjo composto por dois sistemas (A e B) com temperaturas distintas T_A e T_B , separados por um meio condutor de espessura Δx e área de secção transversal A (Figura 2.2), haverá entre os objetos um gradiente de temperatura ΔT na direção x . Dessa forma, se ΔQ é a quantidade de energia térmica transferida entre dois sistemas durante um intervalo de tempo Δt então se pode definir a taxa de condução de energia térmica por unidade de tempo como

corrente térmica I_T , a qual depende da resistência térmica do material condutor, análoga a corrente elétrica num circuito.

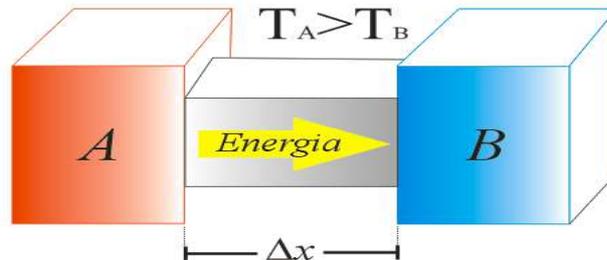


Figura 2.2- Condução térmica entre dois sistemas A e B de temperaturas diferentes, que estão separados por um meio condutor qualquer de espessura Δx .

$$I_T = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.4)$$

A constante de proporcionalidade k na equação 2.4 representa a condutividade térmica do meio em estudo. Esta constante depende das propriedades do meio condutor. Além disso, ela é uma medida da habilidade que um meio tem em transferir energia de um ponto a outro. Sua unidade no SI é o W/mK. Desse modo, materiais com elevado valor de k são considerados bons condutores térmicos e materiais com baixo valor de k são considerados isolantes térmicos. A razão entre a corrente térmica e a área de secção reta do meio condutor é conhecida como Lei de Fourier para a condução térmica. Ela define o fluxo de energia térmica Φ que atravessa o meio. Na direção de propagação da energia a lei pode ser representada matematicamente como:

$$\Phi_x = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.5)$$

cuja unidade no SI é o W/m². O sinal negativo na equação do fluxo térmico é devido ao sentido da transferência de energia, que é naturalmente do local de maior para o de menor temperatura, ou seja, a direção do fluxo é contrária ao gradiente de temperatura.

2.2.1 Transferência de Energia Térmica Para o Solo e Armazenamento

Na superfície do solo terrestre a umidade é um grande moderador, que reduz as rápidas variações de temperatura durante o dia (ARYA, 1998). A irrigação de lavouras de arroz, por sua vez, tem o papel de proteger a plantação de algumas ervas daninhas que não se desenvolvem na água e também contribui na distribuição de nutrientes. Com isso o conteúdo de água no solo ocasiona um aumento na sua capacidade térmica, outro fator que influencia na variação térmica do solo em conjunto com vegetação, que por sua vez aumenta o albedo e utiliza parte da luz para a realização da fotossíntese e aquecimento do dossel. Durante a transferência de energia através de um meio, ainda pode ocorrer absorção dessa energia por parte do meio.

A energia armazenada S num material ou substância depende de uma propriedade denominada capacidade térmica C , que pode ser definida como a razão entre a energia absorvida ou liberada por um sistema e sua variação de temperatura, isto é,

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (2.6)$$

Essa propriedade não pode ser comparada, por exemplo, a capacidade de um copo em armazenar água, pois a energia pode ser fornecida para um meio ilimitadamente até alterar seu estado físico. Dessa forma, a quantidade C varia proporcionalmente com a massa, isto é, se a massa de um material for grande este terá grande capacidade de armazenar energia térmica e vice-versa. Portanto, pode-se dizer que a capacidade térmica representa o quanto de energia deve ser fornecida ou retirada de um sistema para que ocorra uma mudança em sua temperatura. Desse modo, se durante a transferência de energia através de um determinado volume, o sistema libera mais energia do que absorve $\Delta S < 0$ (Figura 2.3-a), o sistema resfria. Se a energia que sai do volume for inferior à energia que entra $\Delta S > 0$ (Figura 2.3-b) o sistema está elevando sua temperatura.

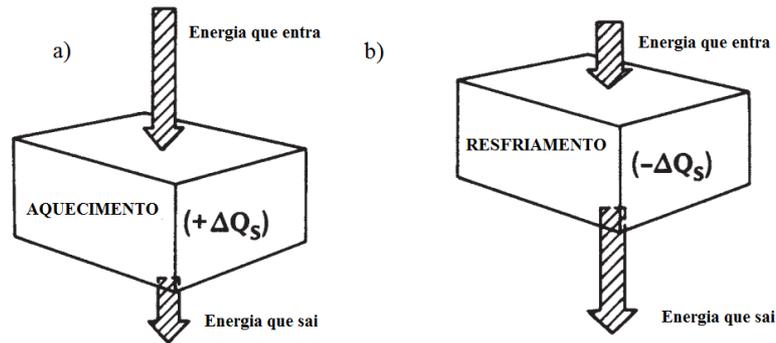


Figura 2.3- Condução e armazenamento de energia. (Adaptado de Oke 1981).

2.2.2 Calor Sensível e Calor Latente

A transferência de energia térmica nas formas citadas neste capítulo depende do tipo de substância ou material e da intensidade de energia que é transmitida ou cedida de um sistema para outro. A transferência de energia num sistema pode ocorrer na forma de calor sensível Q_s ou calor de transformação Q_λ .

Define-se como calor sensível a quantidade de energia retirada ou fornecida a um sistema apenas para variar sua temperatura, isto é, sem que haja mudança de estado físico. Se for retirada energia de um sistema, Q_s é negativo, caso contrário se o sistema estiver recebendo energia Q_s é positivo. Para um determinado sistema, a quantidade de energia na forma de Q_s necessária para variar a temperatura desse sistema dependerá da massa m e do seu calor específico c . Esta quantidade pode ser expressa matematicamente como:

$$Q_s = mc (T_f - T_i) \quad (2.7)$$

Se a energia fornecida ou retirada de um material ou substância for suficiente para mudar seu estado físico, ele é chamado calor de transformação Q_λ . Diferentes substâncias respondem de formas diferentes à adição ou remoção de energia durante a mudança de estado físico devido à diferença na estrutura molecular (SERWAY e JEWETT, 2003). Além disso, a quantidade de energia transferida neste caso irá depender da quantidade de substâncias

envolvidas no processo, isto é, é preciso menos energia para derreter uma pedra de gelo do que para derreter duas.

Além da massa, outro fator importante a ser considerado é o termo λ , que é uma característica do material ou substância denominado calor latente. Esse termo pode ser representado como λ_f quando se considera a fusão do material e como λ_v quando se considera a vaporização de uma substância. Considerando a água como uma substância pura, durante a mudança do seu estado físico, a temperatura deve permanecer constante, desse modo a quantidade Q_λ pode ser obtida por:

$$Q_\lambda = m \lambda \quad (2.8)$$

2.3 Balanço de Energia na Superfície

Como já mencionado, a energia necessária para que ocorram as interações entre a superfície e a atmosfera é praticamente originada do Sol na forma de radiação de onda curta. Durante o dia a superfície recebe radiação solar, eleva sua temperatura e transfere parte dessa energia para a atmosfera na forma de calor. No entanto, durante a noite a superfície tende a perder energia, ficando relativamente mais fria que a atmosfera, logo, durante a noite a direção das transferências de energia são invertidas. Considerada a superfície terrestre como um meio plano e sem vegetação, o saldo de energia disponível nesse sistema pode ser representado matematicamente como:

$$Rn = H + Le + G \quad (2.9)$$

A magnitude de Rn pode ser quantificada por um único sensor, da mesma forma que o fluxo de calor que ocorre no solo G . Por convenção os fluxos são considerados positivos quando partem da superfície e negativos quando direcionados a ela (ARYA, 1998). Para condições reais, a equação 2.8 recebe uma variável a mais, conhecida na literatura como fluxo

de energia residual R (FOKEN et al., 2006b; CAVA et al., 2008; RAMIREZ et al., 2010). Dessa forma a equação 2.8 pode ser reescrita na forma:

$$R_n = H + Le + G + R \quad (2.10)$$

O valor de R representa o somatório dos fluxos de energia que não podem ser calculados pelo método *Eddy Covariance*, por exemplo, o fluxo de energia absorvida pelas plantas para a realização da fotossíntese (MEYRES e HOLLINGER, 2004). Estudos realizados sobre o fechamento do balanço de energia objetivam em sua maioria estimar o valor de R .

2.3.1 Fluxo turbulento - Método *Eddy Covariance*

O fluxo de uma grandeza qualquer x pode ser definida como a quantidade dessa grandeza que atravessa uma superfície de área A por unidade de tempo, cuja direção \hat{n} do movimento, é normal à esta superfície (OKE, 1978; ARYA, 1998). No SI a unidade de fluxo pode ser dada em W/m^2 .

Muitos estudos na área da meteorologia preocupam-se em caracterizar o estado da atmosfera turbulenta. Neste contexto, o método *Eddy Covariance* permite calcular o fluxo de um escalar qualquer utilizando a covariância entre a flutuação da velocidade do vento e a flutuação de uma grandeza escalar transportada na atmosfera. Sua vantagem é proporcionar leituras diretas, sem a necessidade de medidas de valores da componente horizontal do vento, da rugosidade da superfície ou da altura em que são feitas as medidas. Segundo Lee et al. (2008), essa técnica é predominante para o estudo de fluxos devido a sua robustez e utilização de sensores modernos para sua aplicação, permitindo essa forma, a obtenção dos fluxos turbulentos na camada limite interna da atmosfera direta e sem constantes empíricas (KAIMAL e FINNIGAN 1994; LEE et al., 2004; FOKEN 2008). No entanto, o método se restringe a uma superfície idealizada, isto é, homogênea, horizontal, relativamente lisa e opaca à radiação solar (OKE, 1987; ARYA, 1998; FOKEN, 2006a).

O processo de transferência vertical de energia e massa, utilizados no FBE, está diretamente relacionado ao transporte turbulento do ar e também a grande flutuabilidade das variáveis envolvidas na técnica de fechamento. Através da covariância entre a parte turbulenta da componente vertical do vento e a parte turbulenta das variáveis de temperatura (T) e umidade (q), é possível obter respectivamente o fluxo turbulento de calor sensível (H) e o fluxo turbulento de calor latente (Le), termos utilizados para a realização do FBE. Os termos H e Le podem ser descritos conforme as equações 2.11 e 2.12 de forma simplificada.

$$H = \mu c_p \overline{w'T'} \quad (2.11)$$

$$Le = \mu \lambda \overline{w'q'} \quad (2.12)$$

em que μ é a densidade volumétrica do ar atmosférico, c_p é o calor específico do ar a pressão constante e λ é o calor latente de vaporização da água.

3 METODOLOGIA

O experimento compreendeu a um intervalo de tempo de 158 dias ao total. Para tanto, utilizou-se dados experimentais referentes à cultura de arroz iniciada em 2011 e encerrada em 2012. Dentre os 158 dias, foram analisados três períodos distintos de 9 dias cada, a saber:

I - solo seco, cujos dias analisados estão entre 02/08/2011 e 10/08/2011;

II - solo irrigado, no qual o solo estava sendo preparado para o plantio. Neste período os dias analisados foram entre 23/08/2011 a 31/08/2011;

III - solo irrigado e com arroz, no qual o solo ainda encontrava-se irrigado com arroz na fase reprodutiva, de 15/12/2011 a 23/12/2011.

O ciclo da cultura, na qual se desenvolveu esta pesquisa compreende os seguintes estágios:

- Entre 17 de março de 2011 até 10 de agosto de 2011 a superfície apresentava-se no estado de pousio (solo seco e sem arroz).
- Em 10 de agosto de 2011 o solo foi irrigado e preparado para o plantio pré-germinado.
- Em 06 de outubro de 2011 deu-se início ao o plantio.
- Início da colheita no dia 23/04/2012

A técnica *Eddy Covariance* foi utilizada para estimar os fluxos turbulentos de calor sensível e latente. Além disso, as condições ambientais de cada período foram analisadas com base nas informações disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) em seus boletins técnicos disponíveis no *site*, no *menu* “Tempo” no *link* “BOLETINS E ANÁLISES TÉCNICAS”. Além disso, imagens de satélite no canal visível também foram obtidas através do *site* do CPTEC no *menu* “Imagens de Satélite”, no *link* “Banco de Imagens”. As imagens correspondem a cada dia referente aos períodos analisados e a localização aproximada do local de estudo está indicada em cada figura. Essas imagens estão em anexo da seguinte forma: A, para o período I, B para o período II e C para o período III. As imagens de satélite no canal visível foram escolhidas pela possibilidade de registrar a presença de nuvens em qual quer altitude.

3.1 Sítio Experimental

O sítio experimental (Figura 3.1) está localizado no município de Cachoeira do Sul – RS, no Brasil. A área é uma cultura de arroz irrigado por inundação com aproximadamente 1000 hectares¹, subdividida em parcelas de 100 m por 100 m. Esta área é uma antiga região de várzea natural cuja superfície foi modificada para o cultivo de arroz (área sistematizada). A superfície do local utilizada para a plantação apresenta condições variadas, isto é, apresenta-se seco com vegetação baixa restante da cultura anterior (períodos de pousio) e inundado nas épocas de plantio do arroz até a colheita.



Figura 3.1 – Sítio experimental de Cachoeira do Sul.

No local de experimento, uma torre micrometeorológica instrumentada de 3 m de altura está instalada em meio a duas parcelas da lavoura (Figura 3.2) a qual está localizada pelas coordenadas (lat. -30.2771 long. -53.1479). A torre está em operação desde 10 de outubro de 2009. Atualmente o sistema de armazenamento de dados e de alimentação da torre foi modificado com: a retirada do computador onde os dados eram armazenados e a instalação de um painel solar para evitar perda de dados devido a falhas de energia elétrica.

Próximo à torre encontra-se um canal de irrigação por onde escoar a água para irrigação. Em geral canal de irrigação se encontra sempre com um determinado nível de água, o que pode influenciar na comparação do *Le* entre períodos de pousio e períodos de plantio irrigado. A região apresenta clima subtropical com temperaturas que atingem valores negativos durante a noite e chegam a 40 °C durante o dia.

¹1 hectare equivale a uma área de 10.000 m².



Figura 3.2 – Imagem da torre micrometeorológica instalada entre duas parcelas da lavoura.

A torre utilizada no sítio experimental (Figura 3.2) apresenta os seguintes sensores: sensor de direção e velocidade do vento (2,5 m; CSAT3D); analisador de gás de caminho aberto, H₂O e CO₂ (2,5 m; LICOR Li-7500); saldo de radiação (2,5 m; NET NR-Lite - kipp & zonen); radiação global (1 m; CMB6 - kipp & zonen); radiação fotossinteticamente ativa (1 m; PAR LITE - kipp & zonen), fluxo de energia no solo; Fluxímetro (2 cm abaixo da superfície; HFP01SC), Temperatura no solo (2 cm abaixo da superfície); Termopar tipo E-TCAV-L); temperatura do solo (T-107-C utilizado na lâmina d'água); precipitação (3 m; TB4 Rain Gauge measurement); temperatura e umidade relativa (3 m; Termo-higrômetro HMP-45). A aquisição dos dados é feita numa frequência de 10 Hz por um coletor de dados (CR-1000). Medidas realizadas na frequência de 0,01 Hz, também foram obtidas. O sensor Licor LI-3000A foi utilizado para a medição da área foliar. Os dados obtidos pelos sensores da torre são armazenados no coletor de dados em formato binário que por sua vez transfere os dados para um computador instalado no local operando diariamente. Os dados coletados do sistema da torre são convertidos em formato decimal separados por dia ou hora. Logo então passam por um software que calcula os fluxos turbulentos pelo método *Eddy Covariance* com médias simples de 30 min de dados. Os dados finais foram dispostos em arquivos separados por colunas.

3.2 Medidas Biofísicas

Conforme alguns autores, a vegetação pode ter significativa influência no FBE. Com base nessa hipótese procurou, neste trabalho, realizar medidas do Índice de Área Foliar (IAF) do arroz, utilizando um método destrutivo para realização dessas medidas. Esse método de obtenção do IAF é o mais confiável, pois depende de cálculos diretos sobre a quantidade de massa da planta e não depende da radiação como recurso (ZANCHI et al., 2009). O IAF é definido como a razão entre a quantidade de área foliar de uma planta e área de superfície na qual ela se encontra. Portanto, os valores de IAF podem ser utilizados em modelos hidrológicos e de crescimento vegetativo, permitindo assim, que se façam estimativas do uso de água em florestas e plantações, desempenhando um papel fundamental na avaliação de impactos ambientais. Para a realização das medidas de IAF, neste trabalho, foi utilizado o aparelho Licor-LI-3000A (Figura 3.3a-b).



a)



b)

Figura 3.3 – (a) Realização da medida de área foliar com o aparelho Licor LI-3000A. (b) Aparelho utilizado na medição de área foliar, Licor LI-3000A.

Desse modo, para obtenção dessas medidas primeiramente foi realizada uma estimativa do número amostras existente numa área de 1 m^2 . Essas amostras foram escolhidas aleatoriamente nas proximidades torre micrometeorológica dentro de um raio de 3 m. No entanto, foram, para cada visita ao local do experimento realizadas as coletas, cujo número foi 10 amostras destrutivas da planta. Dessas, se obteve uma soma da área foliar de cada pé e

após uma média da área foliar de cada planta. O resultado dessas medidas foi multiplicado pelo número estimado de plantas por metro quadrado de superfície, cujo valor médio foi estimado em $333,06 \text{ pés/m}^2$. Obter o IFA do arroz neste caso envolveu muito trabalho, como: frequentes visitas ao local, coleta de amostras, transporte das mesmas em recipiente térmico, fazer a limpeza das amostras e remoção da umidade das folhas para não danificar o aparelho de medição de área

3.3 Medidas na lamina d'água

O armazenamento de energia no solo, na vegetação e no caso de lavouras irrigadas, a energia armazenada na lâmina d'água podem influenciar diretamente no FBE. Dessa forma, buscou-se estimar neste trabalho o fluxo de energia através da água Fa sobre a lavoura de arroz utilizando a lei da condução térmica de Fourier (Equação 2.5). Essas medidas foram obtidas através de um sistema representado na figura 3.5a-b.

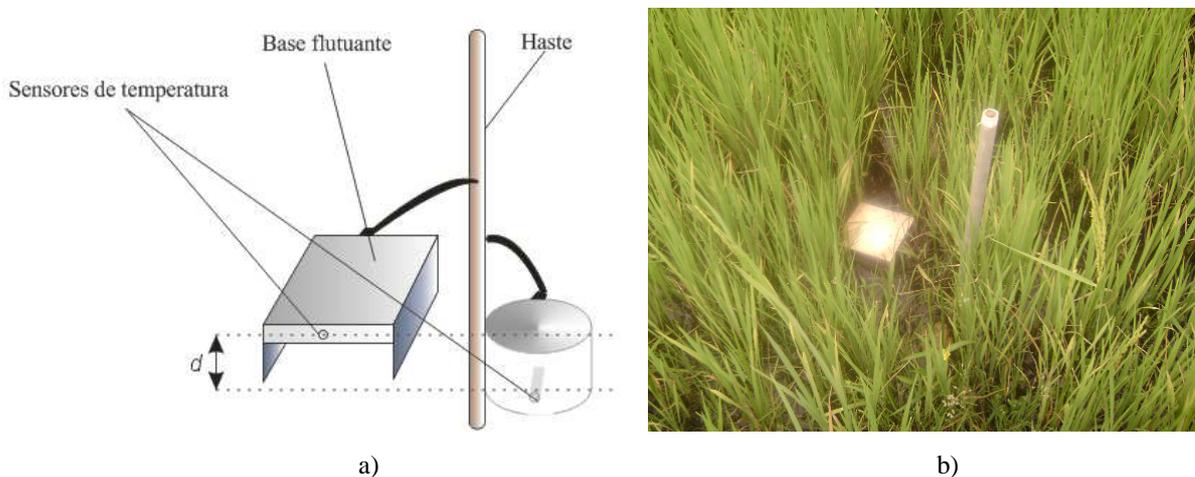


Figura 3.5 – Esquema de montagem do sistema para medir a temperatura da lâmina d'água sobre a lavoura em dois níveis.

Nesse sistema, um sensor de temperatura foi mantido na superfície do solo em contato com a água e o outro sensor foi mantido num dispositivo flutuante para que as medidas fossem apenas da lâmina de água (Figura 3.5a). Ambos os sensores foram protegidos

da luz solar, para evitar alterações nas medidas devido à radiação solar. Os sensores foram fixados em uma determinada posição próximos à torre de medição por uma haste metálica. A cada visita realizada no local, os sensores eram retirados da água, postos lado a lado para verificar a precisão nas medidas. Desses valores se obteve uma média da diferença entre um sensor e o outro. A diferença média entre os valores fornecidos pelos sensores foi utilizada para fazer um ajuste no cálculo do fluxo de energia na lâmina d'água, o qual dependeu do gradiente de temperatura.

4 RESULTADOS

Os dados escolhidos para análise corresponderam aos dias em que houve menor índice de falhas no sistema de medição da torre. Os problemas na estação micrometeorológica foram associados às falhas no funcionamento do computador responsável por armazenar os dados do coletor de dados e a quedas de energia.

4.1 Condições Ambientais

Neste capítulo são avaliados os dados de temperatura T , radiação global R_g e magnitude do vento w_s para os três períodos (I - solo seco, II - solo irrigado e III - solo irrigado com arroz. As variáveis analisadas no primeiro período (Figura. 4.1a-c), época de pousio, apresentou temperatura média no local de 15 °C (Figura 4.1a). Segundo o boletim técnico obtido através do *site* do CPTEC, No dia 02/08/2012 foi constatada a presença de uma frente fria sobre o estado do Rio Grande do Sul, o que pode ter contribuído para a redução da temperatura média no local do experimento até o dia 04/08/2011. O valor máximo atingido foi em torno de 30 °C no dia 08/08/2011.

A radiação global (figura 4.1-b) média para os nove dias foi aproximadamente 156,00 W/m² e a máxima foi superior a 750 W/m². Esse valor foi favorecido pela pouca presença de nuvens sobre o estado entre os dias 05 e 07/08/2011 (Anexo A) devido à presença de um sistema de alta pressão que atuava sobre o estado. A magnitude do vento, mostrada na figura 4.1c foi em média de 3,8 m/s e seu valor máximo foi superior a 10 m/s no dia 02/08/2011. Nota-se também que as elevadas amplitudes de w_s coincidiram com as baixas amplitudes de R_g . Entre os dias 08 e 09/08/2011 houve falhas de energia na torre e conseqüentemente perda de dados referentes a um pequeno intervalo de tempo.

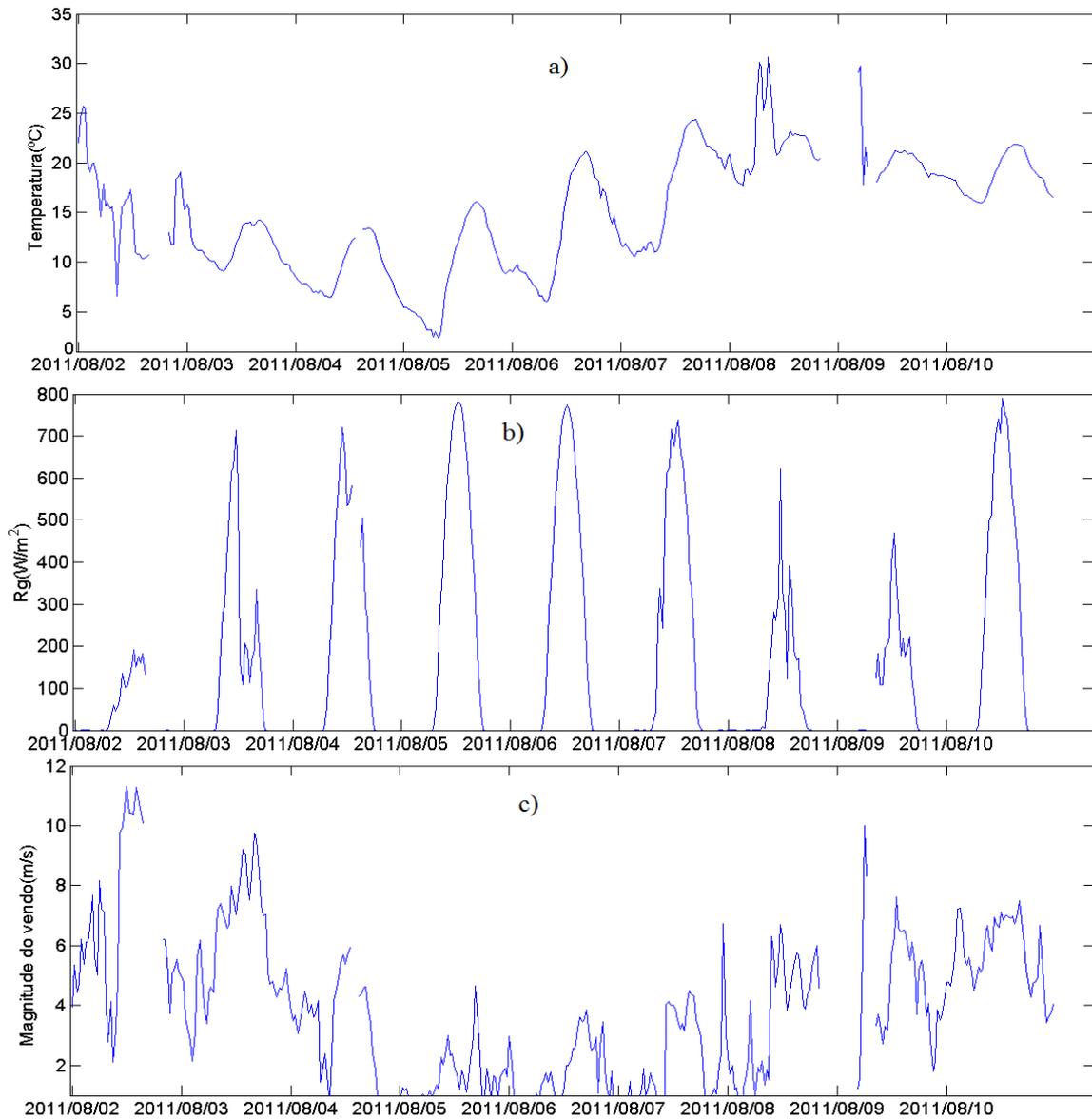


Figura 4.1 – Condições ambientais referentes ao período de solo seco (I) para: (a) temperatura, (b) radiação global e (c) magnitude do vento.

As variáveis T , R_g e sw para o segundo período (solo irrigado), são apresentadas na figura 4.2a-c. Nesse período, a temperatura média foi de aproximadamente 15°C e as máximas foram próximas de 25°C entre os dias 27 e 28/08/2011. A radiação global média neste período foi de $244,45\text{ W/m}^2$. Ainda nesta análise verifica-se que a magnitude média do vento é 3 m/s . Entre 23 e 29/08/2011 houve presença de nebulosidade sobre o estado (Anexo B), o que pode ter resultado nas variações picos de R_g durante o dia. Na figura 4.2-a nota-se também que as amplitudes térmicas aumentaram até o dia 25/08/2011, e após houve uma redução. Esse acontecimento ocorreu devido a presença de uma frente fria que passava sobre

o estado. Uma massa de ar polar atuou no dia 30/08/2011, o que contribuiu para as reduções de temperatura observadas na figura 4.2-a.

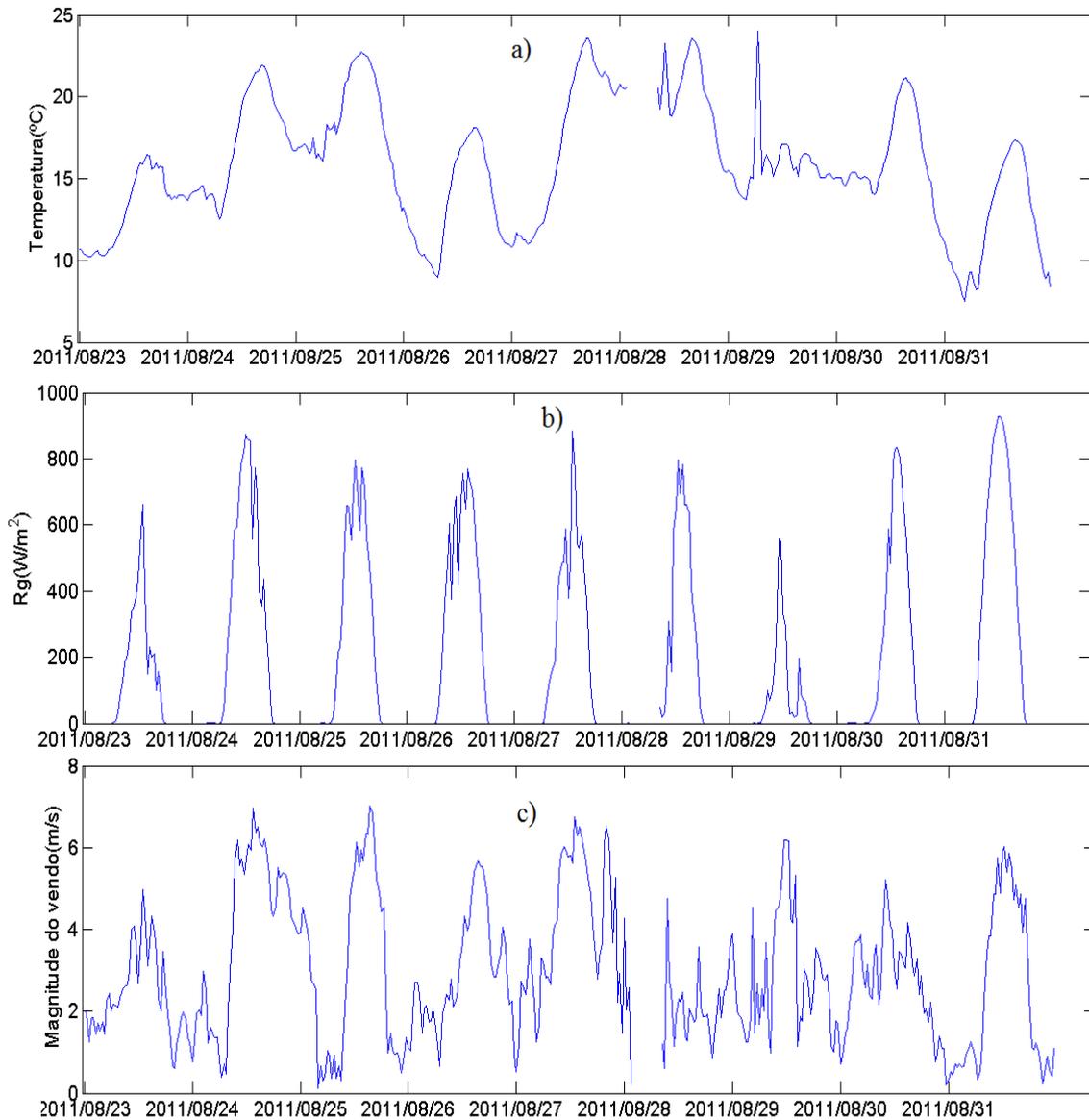


Figura 4.2 – Condições ambientais referentes ao período de solo irrigado (II) para: (a) temperatura, (b) radiação global e (c) magnitude do vento.

O período III (Figura 4.3) mostra um grande aumento na temperatura atmosférica, uma vez que a estação do ano é típica destes valores. A média da temperatura local foi de 24°C , alcançando um valor máximo de 35°C no dia 20/12/11. Entre 19 e 21/12/11 as altas temperaturas foram favorecidas por um sistema de alta pressão que passava sobre o estado. A radiação global média nesse período foi de $347,5 \text{ W} / \text{m}^2$.

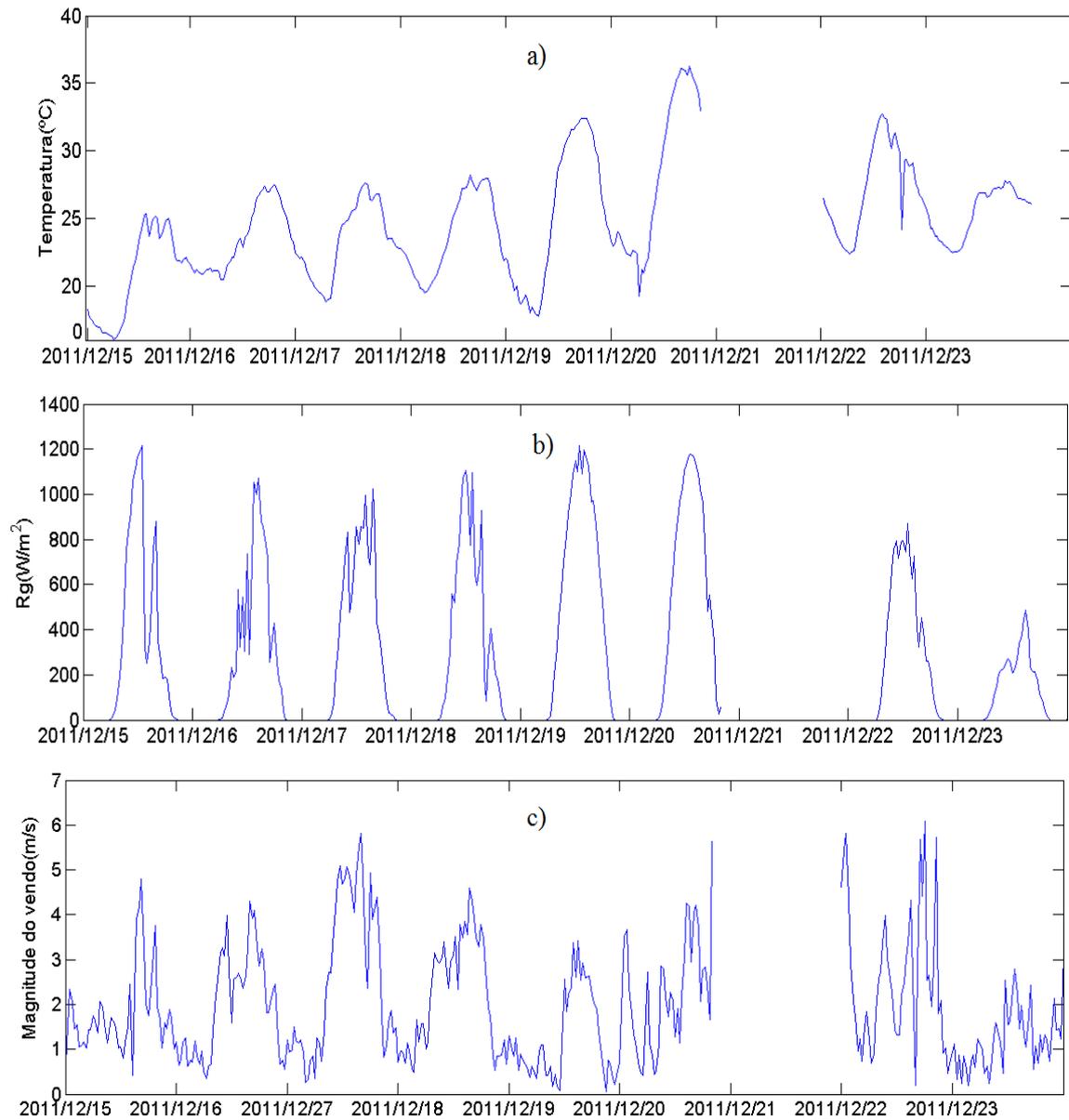


Figura 4.3 – Condições ambientais referentes ao período de solo irrigado com arroz (III) para: (a) temperatura, (b) radiação global e (c) magnitude do vento

A velocidade do vento neste caso apresentou uma média de 2 m/s. As imagens de satélite (Anexo C) mostram que entre 15 e 21/12/2012 houve presença de pouca nebulosidade sobre o estado, o que influenciou nas oscilações de R_g (Figura 4.3-b) durante o dia. A presença de uma zona de baixa pressão com convergência de umidade entre 15 e 18/12/11 e entre 22 e 23/12/11 foi o fator que favoreceu a formação de nuvens sobre o estado do Rio Grande do Sul nesses dias.

4.2 resultados Biofísicos

O índice de área folia representado no quando 4.1 mostra como a evolução do arroz durante o experimento. O plantio do arroz foi realizado no dia 06/10/11e as medidas de IAF começaram no dia 18/11/11, quando o arroz já estava com uma altura de aproximadamente 25 cm.

Quadro 4.1 – Evolução do arroz para o período analisado.

Data	Altura média (cm)	IAF(m^2 / m^2)
18/11/2011	25,50	1,0261
29/11/2011	27,70	1,2131
19/12/2011	29,45	1,4163
29/12/2011	30,55	1,1799
13/01/2012	40,15	1,3539
27/01/2012	50,30	3,3515
03/02/2012	55,25	2,0700
10/02/2012	56,80	1,8725

O valor máximo atingido pelo IAF foi verificado no dia 27 de janeiro de 2012, cujo valor foi de aproximadamente $3,3 m^2/m^2$. O valor máximo obtido por Carlesso te al. (1998) para o arroz foi de $2,45 m^2/m^2$. Após ter atingido seu valor máximo, os valores começaram a reduzir devido ao ressecamento das folhas da planta. Se há aumento no fluxo de energia residual devido à energia utilizada pelo arroz no processo de fotossíntese, este a aumento deve ser proporcional ao IAF, uma vez que quanto maior for a área da folha, maior é a área de interceptação de luz solar.

4.3 Componentes do Balanço de Energia

Para análise das componentes do FBE foram descartados dados referentes às medidas diárias, uma vez que o método de obtenção dos fluxos turbulentos depende da turbulência atmosférica, que tem maior intensidade durante o dia. No primeiro período (Figura 4.4), o fluxo de calor latente médio foi de $96,9 \text{ W/m}^2$, a média do fluxo de calor sensível foi de $17,9 \text{ W/m}^2$ e o fluxo de energia transferida para o solo obteve um valor médio de $12,5 \text{ W/m}^2$, mostrando que nesta fase pouca energia é transferida para o solo e a maior parte de Rn é utilizada para evaporação da água. H e G apresentam valores próximos em relação a Le .

Os fluxos de energia para o período II (solo irrigado) são mostrados na figura 4.5. O fluxo de calor latente durante esse período adquiriu um valor médio de aproximadamente 115 W/m^2 , representando um aumento em torno de 18 W/m^2 em relação ao primeiro período. Este aumento deve-se a maior quantidade de vapor de água no local devido a irrigação da área de plantio. Já valor médio do fluxo de calor sensível foi próximo ao período anterior cujo valor ficou em torno de $20,06 \text{ W/m}^2$.

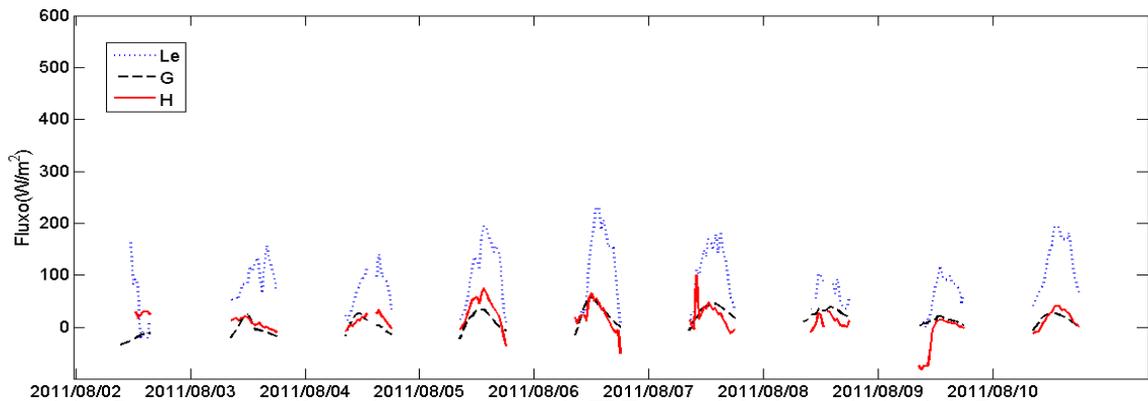


Figura 4.4 – Comportamento diurno das componentes do FBE no período de pousio (período I).

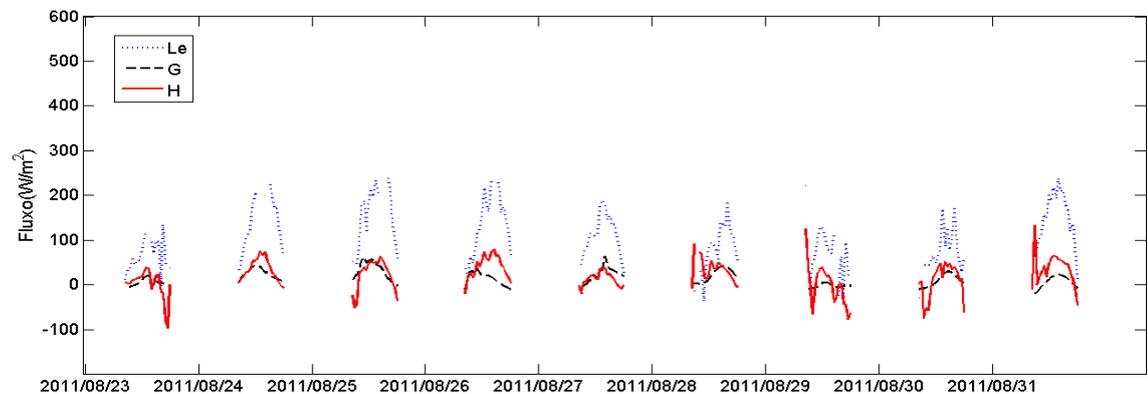


Figura 4.5 - Comportamento diurno das componentes do FBE no período de solo irrigado (período II).

O fluxo de calor no solo obteve uma média de $13,7 \text{ W/m}^2$, um resultado importante, que indica a irrigação do solo não ocasionou grande efeito sobre a energia transferida para as acamadas do solo.

Além do mais, o terceiro período (Figura 4.6), no qual o solo apresentava uma considerável cobertura vegetal, de modo que IAF correspondeu a um valor médio de $1,4163 \text{ m}^2/\text{m}^2$ (fase reprodutiva do arroz). Nesse período o fluxo de calor latente apresenta-se elevado em relação aos períodos I e II, com a média em torno de $234,3 \text{ W/m}^2$. Este aumento deve-se principalmente à maior quantidade de energia líquida disponível no sistema nesta época do ano (verão local). No entanto o fluxo energia disponível para aquecimento do sistema na forma de calor sensível foi em média $8,2 \text{ W/m}^2$. A presença de vegetação e água sobre a superfície favoreceu a transferência de energia para o solo, que chegou a atingir um valor médio de $23,4 \text{ W/m}^2$.

Os picos atingidos pelo fluxo de calor sensível antecedem os picos de G . Essa defasagem é melhor observada neste período, pois o elevado calor específico da água em conjunto com a cobertura vegetal aumentam a resistência à passagem de energia para o solo. Sendo assim, as variações de temperatura da atmosfera se dão mais rapidamente que nas camadas mais internas do solo, entretanto, o princípio básico de obtenção dos fluxos de energia é o gradiente de temperatura.

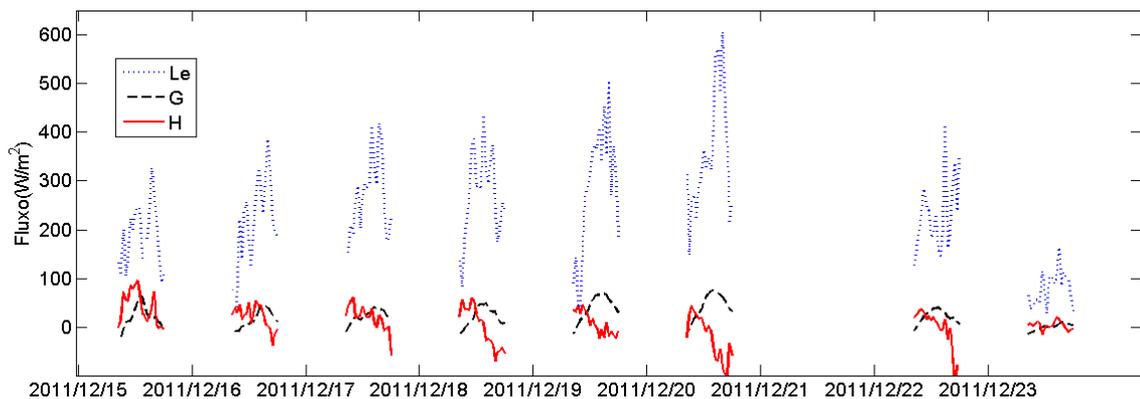


Figura 4.6 - Comportamento diurno das componentes do FBE no período de solo irrigado com arroz (período III).

No quadro 4.2 são dispostas as relações de porcentagem de cada componente do FBE em relação à radiação líquida média disponível no sistema correspondente a cada período. Observa-se no quadro que o fluxo de calor latente e o fluxo de calor no solo mantiveram-se

proporcionais à radiação líquida no sistema durante os três períodos, com médias de 60% e de 7% para os fluxos de calor latente de no solo respectivamente.

Quadro 4.2 – Relação das componentes do FBE com a radiação líquida média em cada período

Período	$\overline{Rn} (W / m^2)$	$H(\%)$	$Le(\%)$	$G(\%)$
I- solo seco	154,4	11	62	8
II- solo irrigado	196,0	10	58	7
III- solo irrigado com arroz	368,3	2	60	6

Portanto, esses resultados mostram que a irrigação do local não alterou significativamente o fluxo de calor sensível, mas a presença do arroz reduziu em 2% o fluxo de calor sensível. Oliveira et al (2009) ao estudar o FBE em uma cultura de mamona no estado da Paraíba, cultivada em condições de solo seco, encontraram uma porcentagem em relação a Rn de 52% para Le , 38% para H e de 10% para G . Lima et al. (2011) determinaram estas relações para uma cultura de Feijão. Eles encontraram uma relação de 65% para Le , 23% de H e 12% de G . Já Gonçalves et al. (2011), em uma cultura de arroz no Rio Grande do Sul, encontraram uma porcentagem correspondente a Rn de 55% para Le , 33% para H e 18% para o fluxo de calor no solo. Em condições de solo irrigado os resultados foram de 75% para Le , 18% para H e de aproximadamente 10% para o fluxo de calor no solo.

4.4 Energia na Lâmina d'água

Os dados de temperatura da água na lavoura no período III (solo irrigado com arroz) foram utilizados para estimar o fluxo de energia na lâmina de água através da Lei de Fourier para a condução térmica. Os sensores utilizados no local de experimento foram, após o preparativo para colheita, retirados do sítio de experimento e colocados lado a lado durante um período de 8 dias no laboratório de micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria. O objetivo deste procedimento foi de fazer uma comparação entre os sensores e, dessa forma se obter uma relação de precisão nas medidas realizadas.

Os resultados mostrados na figura 4.7 indicam uma diferença média entre os sensores de $\overline{T_1 - T_2} = 0,070110 \pm 0,03700$ °C e coeficiente de determinação $R^2=0.99$, o que indica 99% da variância de T_1 é explicada pela variância de T_2 , que por sua vez implica em boa eficiência dos sensores utilizados.

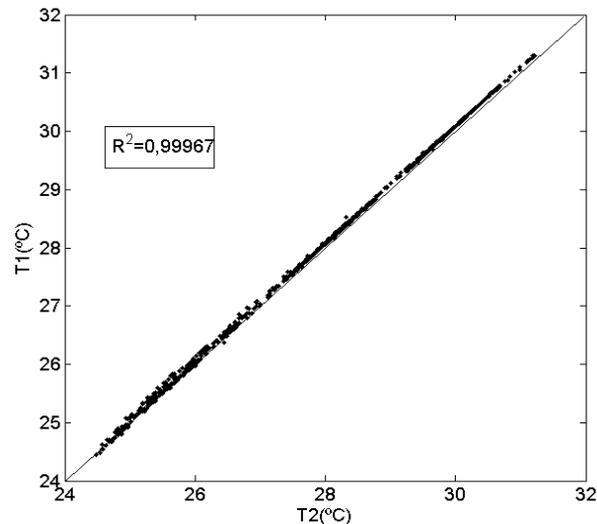


Figura 4.7 – Comparação realizada para 8 dias de medidas entre os sensores de temperatura utilizados para estimar o fluxo de energia na lâmina de água.

A figura 4.8 mostra o ciclo diário do fluxo de calor na água obtido para um período de 30 dias (mês de dezembro de 2011), o qual mostra que aproximadamente entre 20 h e 8 h a transferência de energia se dá da água para a atmosfera e valor máximo foi atingido entre 12 h e 14 h passou de 20 W/m^2 .

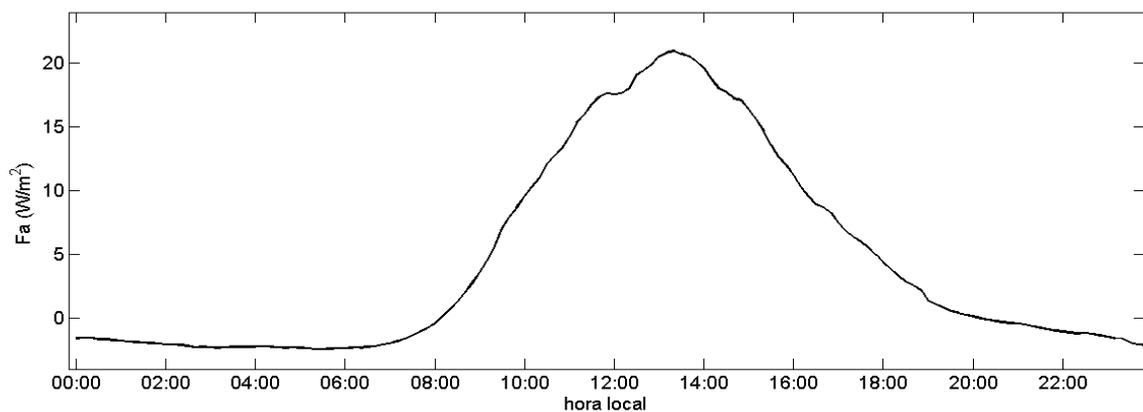


Figura 4.8 – Ciclo diário do fluxo de energia estimado na lâmina de água.

4.5 Fechamento do Balanço de Energia

No primeiro I, de solo seco (Figura 4.9), o FBE foi melhor estimado em relação aos demais períodos. Os dias referentes ao mês de agosto correspondem a períodos de baixa intensidade de radiação global R_g devido ao clima característico da região (inverno local). A radiação líquida R_n máxima atingida observado foi no dia 06/08/2011, cujo valor médio foi de 400 W/m^2 . Já o valor mínimo de R_n foi registrado no dia 02/08/2012, no qual houve falhas nas medições utilizadas para o cálculo de fluxos.

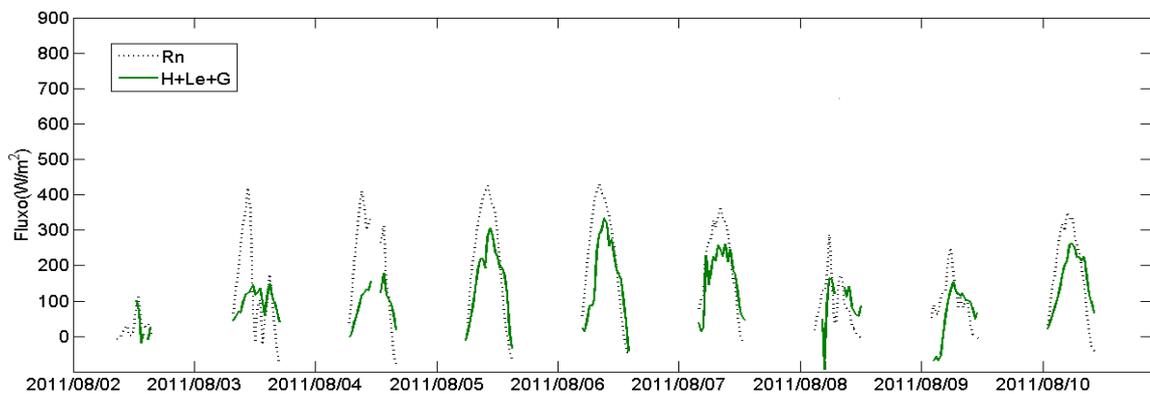


Figura 4.9 – Comparação entre radiação líquida e o fechamento no balanço de energia para o período I (solo seco)

No período de solo irrigado (Período II), embora a figura 4.10 mostre que há uma melhor aproximação de R_n , o FBE correspondeu a uma média de 75% do seu valor, no período I, essa média chegou a 82 %, isto é, a presença da água sobre a lavoura ocasionou um maior déficit no FBE na superfície local. Além disso, em relação ao período I, as variáveis de fluxo que tiveram grande aumento foram H e Le . No último período (Figura 4.11), a presença da água e arroz sobre a superfície, proporcionou um FBE em média de 440 W/m^2 , um equivalente a 68 % de R_n , ou seja, a presença do arroz também influenciou balanço de energia, uma vez que parte da energia disponível no sistema é utilizada pela vegetação no processo de fotossíntese.

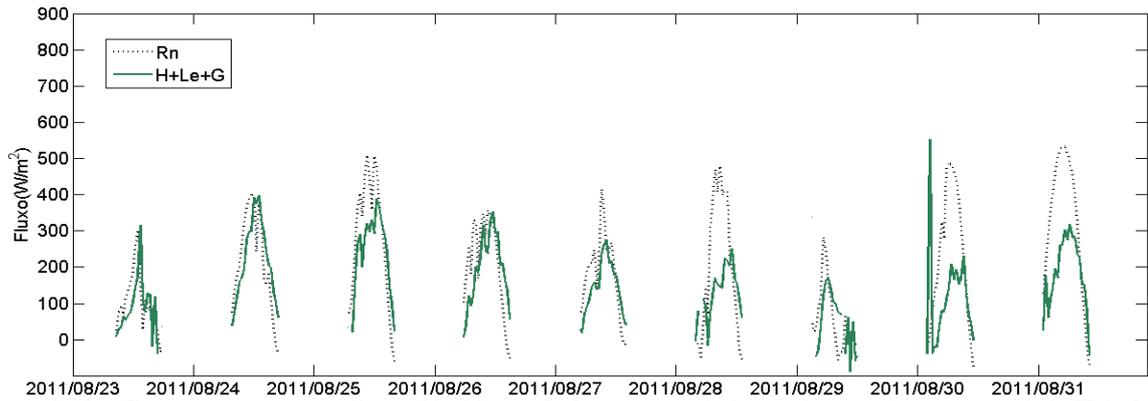


Figura 4.10 – Comparação entre radiação líquida e o fechamento no balanço de energia para o período II (solo seco)

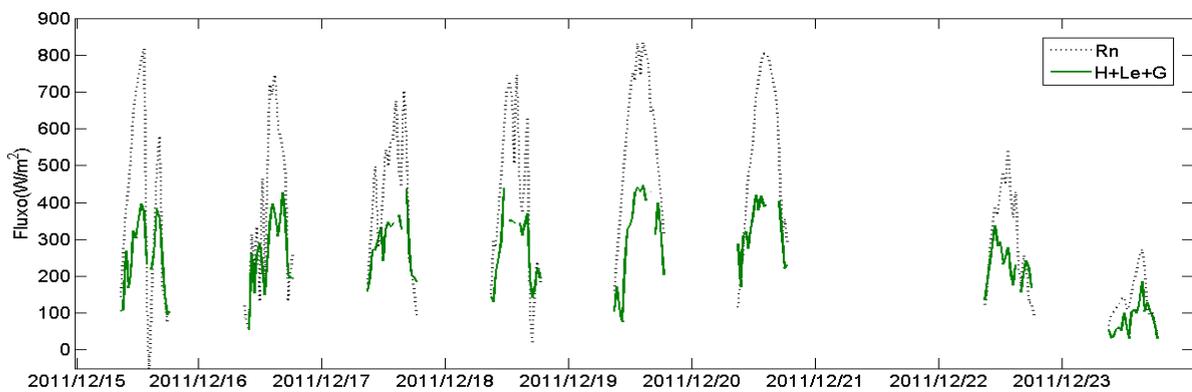


Figura 4.11 – Fechamento do balanço de energia para o período III (irrigado e com arroz).

Com base nos gráficos obtidos, é possível observar que parte a energia faltante para o FBE pode estar sendo armazenada na lâmina d'água sobre e na vegetação conforme sugerido por Foken et al. (2006-b) e Cava et al. (2008). O FBE nos estudos de Gonçalves et al. (2011) foram de aproximadamente 106 % para a cultura de arroz em solo seco e de 103 % em condições de solo irrigado. Alberto et al. (2011) encontram o FBE em uma cultura de arroz irrigado de aproximadamente 72 %. Utilizando métodos de ajuste e posicionamento dos sensores utilizados para a técnica *Eddy Covariance* Cava et al. (2008) obtiveram um FBE para de 80 % numa região de solo plano e vegetação baixa. Esse valor foi valor igualmente encontrado por Parent e Anctil (2012) em uma cultura de batata na Província de Quebec, sudeste do Canadá. Já Santos et al. (2009) comparam o comportamento do FBE em uma cultura de banana no nordeste do Brasil. Eles obtiveram um FBE de 93 % para uma época de seca e de 86 % para uma época de chuvas frequentes, o que mostra que a quantidade de água na região de estudo influencia no balanço energético.

A análise do fluxo de energia residual (Figura 4.12) mostra que a mudança na cobertura da superfície tem influência significativa no FBE, pois em comparação com os períodos de solo seco (período I) e irrigado (período II), o fluxo de energia residual teve um aumento de 18% para 25% com a presença da água. Esse valor foi ainda maior na presença de água e arroz sobre a superfície (período III), isto é, seu valor correspondeu de 32% de R_n .

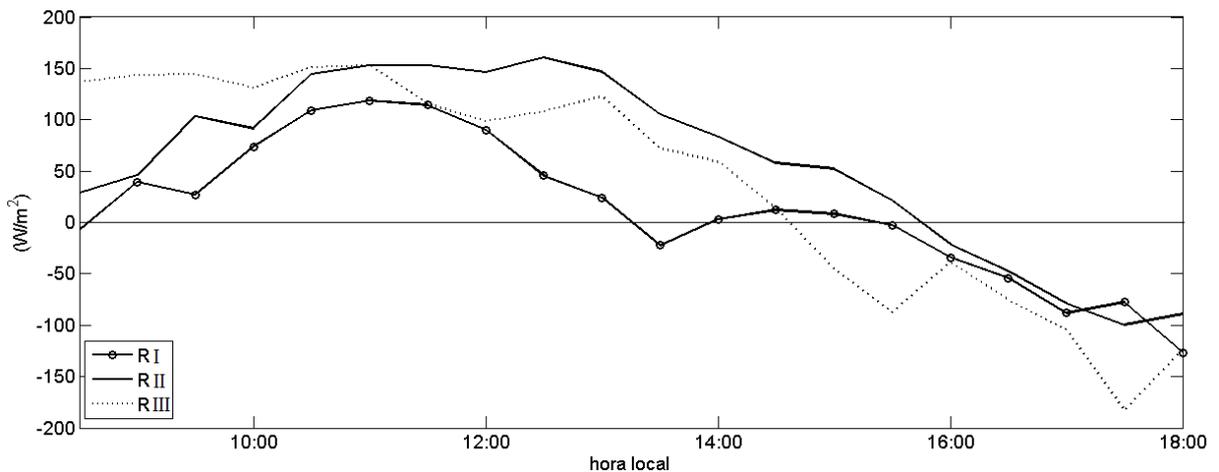


Figura 4.12 – Comparação do ciclo diário do fluxo de energia residual para o primeiro período RI, segundo RII e terceiro RIII.

A figura 4.13 mostra o diagrama de espalhamento para os três períodos. Os gráficos mostraram como se deu o comportamento das variáveis do FBE e de R_n através da equação de ajuste e dos coeficientes de determinação². Os coeficientes de determinação obtidos foram de 0,36 para o período de solo seco (Figura 4.13a), 0,38 para o período de solo irrigado (Figura 4.13b) e 0,7 para ocasião de solo irrigado com arroz (Figura 4.13c). Esses resultados indicam que as variações do FBE foram melhor relacionadas com R_n no terceiro período (solo irrigado com arroz). Além disso, as figuras mostram que o FBE subestima R_n nos horários de maior incidência de luz solar devido à maior atividade turbulenta da atmosfera. Por outro lado, os coeficientes de correlação em cada período foram de 0,89 para o período I, 0,61 para o período II e 0,83 para o período III. Esses valores indicam que o FBE é melhor estimado na ausência de água e vegetação sobre o local, o que confirma a hipótese de que a água e a vegetação podem estar utilizando parte de R_n .

²Medida do grau de relação (positiva ou negativa) entre duas variáveis. Possui variação entre -1e +1.

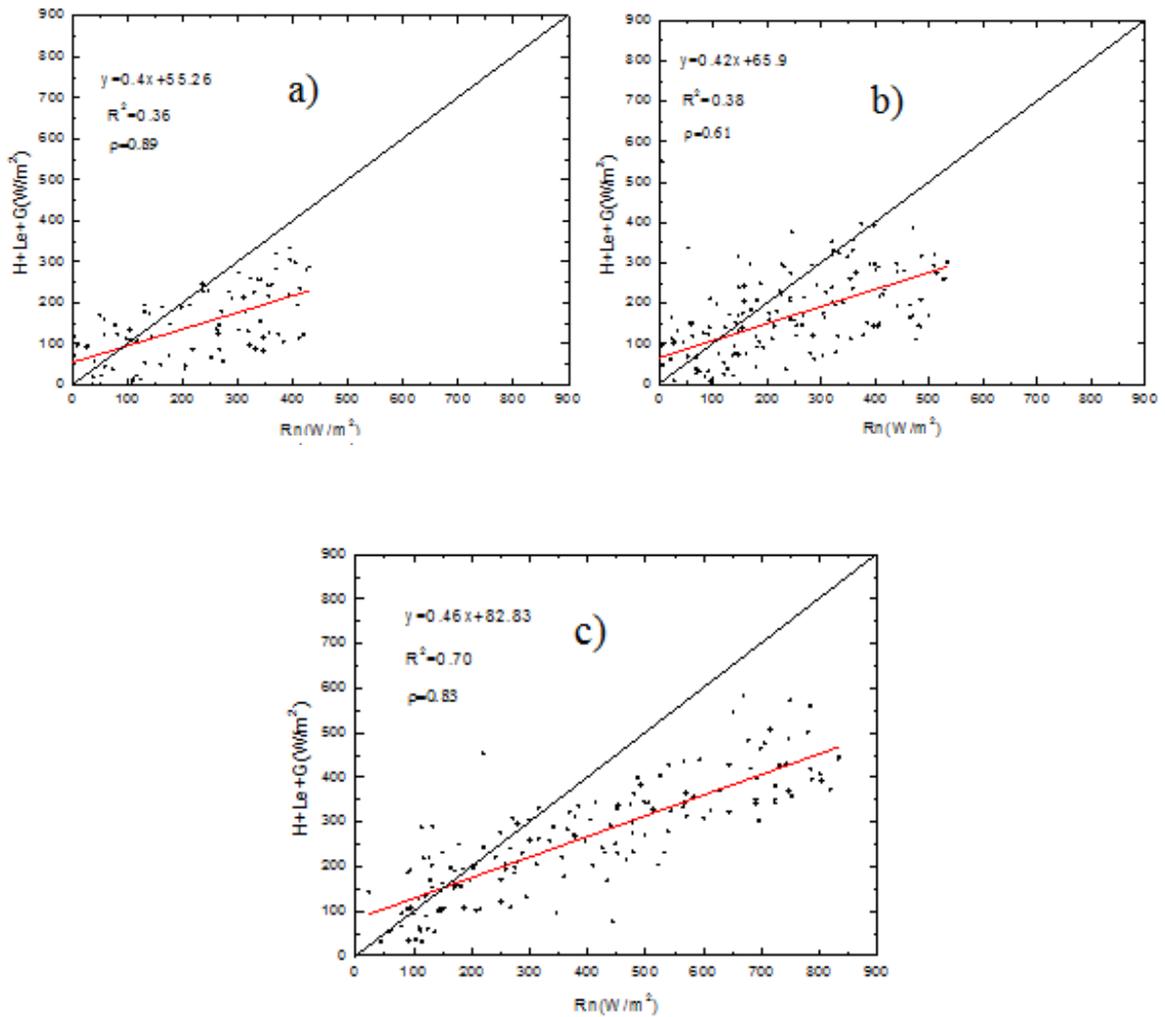


Figura 4.13 – Gráfico de espalhamento do FBE em função de R_n para período I (a), período II (b) e período III (c).

O diagrama de espalhamento para $FBE+Fa$ e R_n mostra que a adição de Fa na equação de fechamento não proporciona melhoria significativa no FBE (Figura 4.14). O coeficiente de determinação para esta ficou em torno de 0,7 e a correlação entre as variáveis obteve uma melhoria de 0,01, indicando que a adição de Fa na equação 2.8 proporciona certa melhoria no FBE embora pequena.

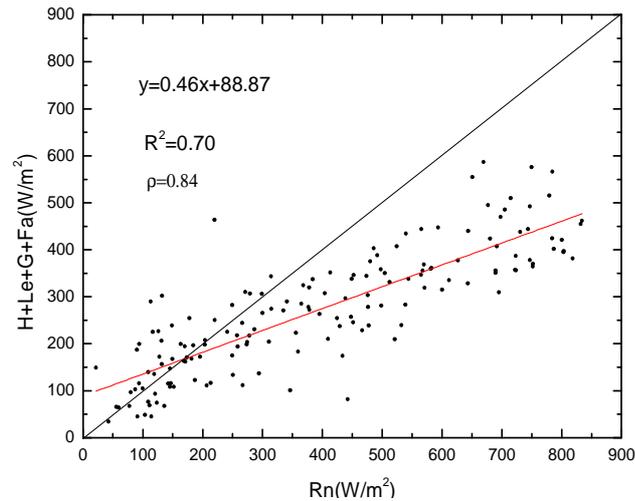


Figura 4.14- Diagrama de espalhamento para o período III com adição do fluxo de calor na água no FBE.

Em um estudo realizado por Aguiar (2011) em uma cultura de milho no Sul do Brasil estes valores corresponderam respectivamente de 0,82 para a inclinação da reta e 0,96 para o coeficiente de determinação. Os valores de R^2 encontrados por Meyres e Hollinger (2004) quando compraram o FBE entre milho e para a soja foram de 0,84 e 0,77 respectivamente. Além disso, eles estimaram os termos de armazenamento, que possibilitaram novos coeficientes de determinação de 0,86 para o milho e de 0,81 para a soja.

5 CONCLUSÕES

Embora os estudos envolvam duas estações climáticas distintas, nota-se que há grande variabilidade térmica da região, chegando a alcançar 30 °C em épocas de inverno na região e temperaturas inferiores a 5°C em dezembro, verão local.

Durante os três períodos os fluxos de energia no solo e calor sensível mantiveram-se sempre baixos em relação ao fluxo de calor latente.

A presença da água sobre a lavoura pouco influencia no fluxo de energia no solo, de modo que seu valor médio no período I é de 13,5 W/m² e no período II é de 12,7 W/m². Na presença do arroz e água (período III) houve um aumento significativo médio de 23 W/m², o que indica que a presença da cobertura vegetal proporciona um aumento na energia transferida para o solo.

Os fluxos G e Le apresentam melhor relação com o aumento da energia líquida disponível no local para os três períodos. A presença da vegetação por sua vez proporcionou uma redução no fluxo de energia para aquecer o sistema H .

O FBE no local alcançou um valor médio de 82% para a ocasião de solo seco (Período I), 75 % quando o solo estava irrigado (Período II) e 68% quando a superfície esteve com água e arroz (Período III), o que mostra que o tipo de cobertura na superfície influencia no fechamento do balanço de.

Os dias com baixos índices de radiação global R_g apresentam melhor fechamento no balanço de energia quando comparados com os demais dias de modo que R_n também é baixo. Este resultado mostrou que pode haver transporte de energia das proximidades do local pelo vento horizontal, visto que não há presença de grande quantidade de árvores nas proximidades do local.

O fluxo de energia através da lâmina apresentou uma pequena melhoria no FBE (Figura 4.10), o que leva a possibilidade de haver armazenamento de energia térmica na própria lâmina de água e também no solo e na vegetação.

Como objetivo de estudos futuros, pretende-se repetir tal experimento com um número relativamente maior de etapas de produção do arroz e aumentar a quantidade de dias analisados. Além disso, estimar a resistência térmica às transferências de energia entre a atmosfera e a superfície.

6. Bibliografia

AGUIAR L. J. **FLUXOS DE MASSA E ENERGIA PARA A CULTURA DE MILHO (*Zea mays L.*) NO RIO GRANDE DO SUL**. . 2011. 112 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola)– Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2011.

ACKOWSKI D. W. **Conduction Heat Transfer Notes for MECH 7210. Mechanical**. Disponível em < <http://www.eng.auburn.edu/~dmckwski/mech7210/condbook.pdf>>. Acesso em 14 ago.2012.

ARYA S. P. **Introduction to Micrometeorology**. 1998, p. 447

BLANCO e FOLEGATTI. A new method for estimating the leaf área index of cucumber and tomato plants. **Horticultura Brasileira**. Brasília, v. 21,n. 4, p. 666-669, Dec. 2003.

CARMELITA M. et al. CO₂/heat in rice fields: Comparative assessment of flooded and non-flooded fields in the Philippines. **Agricultural and Forest Meteorology**. Maryland Heights, v.149, p.1737-1750, Feb. 2009.

CARLESSO R. et al. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E ALTURA DE PLANTAS DE ARROZ SUBMETIDAS A DIFERENTES PRÁTICAS DE MANEJO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 268-272, 1998.

CROWEL B. **Eletricity and Magnetism**. The Light and Matter series of introduction physics textbooks. 2002, p. 174.

COMIM A. N. et al. Variação anual dos fluxos de energia numa cultura de arroz irrigado. **Ciência e natureza**. Disponível em <http://cascavel.ufsm.br/revista_ccne/ojs/index.php/cienciaenatura/article/view/363/274>. Acesso em 01 jan. 2012.

CAVA D., et al. Agricultural and forest meteorology. **Analysis of shorth-term closure of the surface energy balance above short vetation**. Lecce, v.148, n. 1, p. 82-93, 19 Sept. 2008.

EISBERT, RESNICK. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 1985, p. 864.

FERNADES E. J. Estudo do calor sensível e latente obtidos por intermédio da razão de Bowen em uma cultura de soja irrigada. **Irriga Botucatu**. Botucatu, v. 12, n. 3, p. 281-296, set. 2007

FOKEN T. **Micro-meteorology**. Springer, 2006a. p. 320

FOKEN T. et al. Some aspects of the energy balance closure problem **Atmospheric Chemistry and Physics**. Bayreuth, p. 4395-4402. Sept. 2006b

FOKEN T. The Energy Balance Closure Problem: An overview. **Ecological Society of America**. Washington, v. 18, n.6, p. 1351-1367, Sept. 2008

FONTANA D. , M. BERLATO, H. BERGAMASCHI. Balanço de Energia em Soja Irrigada e não Irrigada. **Pesquisa agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 26, n. 3, p. 403-410, mar. 1991.

FAVARIN et al. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 37, n. 6, p 769-773, jun. 2002.

GASPARETTO P. **Relação entre a Altura Média da Camada Limite Planetária e as Condições de Instabilidade atmosférica na Região Metropolitana de Fortaleza-Ceará**. 68p. Monografia [Mestrado em Física], Universidade Estadual do Ceará. Fortaleza, 2011.

GALVANI E. e ESCOBEDO F. **Balanço de Energia numa cultura de pepinos em ambiente natural e protegido**. Campinas, v. 60, n. 2, p. 12-127, 2001

GONÇALVES J. B. Análise das componentes do balanço de energia e do saldo de radiação em uma cultura de arroz para as fases de sequeiro e alagamento. Disponível em http://cascavel.ufsm.br/revista_ccne/ojs/index.php/cienciaenatura/issue/view/38/showToc
Acesso em 01 jan. 2012.

KIDSTON et al. Energy Balance Closure Using Eddy Covariance Above Two Different Land Surfaces and Implications for CO₂ Flux Measurements. **Boundary-Layer Meteorology. Academic Journal**. v. 136, n. 2, p. 193–218, Aug. 2010.

KAIMAL J. C., FINNIGAN J. J., **Atmospheric Boundary Layer Flows**: Their structure and measurement. Oxford University Press, 1994, 289 p.

LEUNING. R. et al. Reflections on the surface energy imbalance problem. **Agricultural and forest meteorology**. v. 156, p. 65-74, Apr. 2012

LIMA J. S. et al. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza. v. 42, n. 1, p 65-74, Jan. 2011.

LIN J. et al. Surface Energy Components and Characteristics of a Rice Paddy. **Journal of Applied meteorology and climatology**. Taiwan, v. 46, p. 1879-1900, Nov. 2007.

MEYERS, T.P., Hollinger, S.E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.125, p. 105-116, Mar. 2004.

OLIVEIRA et al. Balanço de energia em mamona cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrária**. Recife. v. 4, n. 2, p. 185-191, jun. 2009.

ONCLEY S. P. et al The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part I: overview and energy balance. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 123, n. 1, p. 1-28. Dec. 2007.

OKE T. R. **Boundary layer Climates**. London: Routledge: 1987. 435p.

PARENT A. e ANCTIL F. Quantifying evapotranspiration of a rainfed potato crop in South-eastern Canada using eddy covariance techniques. **Agricultural Water Management**. Maryland Heights, v. 113, p. 45-56, Oct. 2012.

RAMIREZ G. H. et al. Energy balance and turbulent flux partitioning in a corn-soybean rotation in the Midwestern US. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 100, p. 79-92, July. 2010.

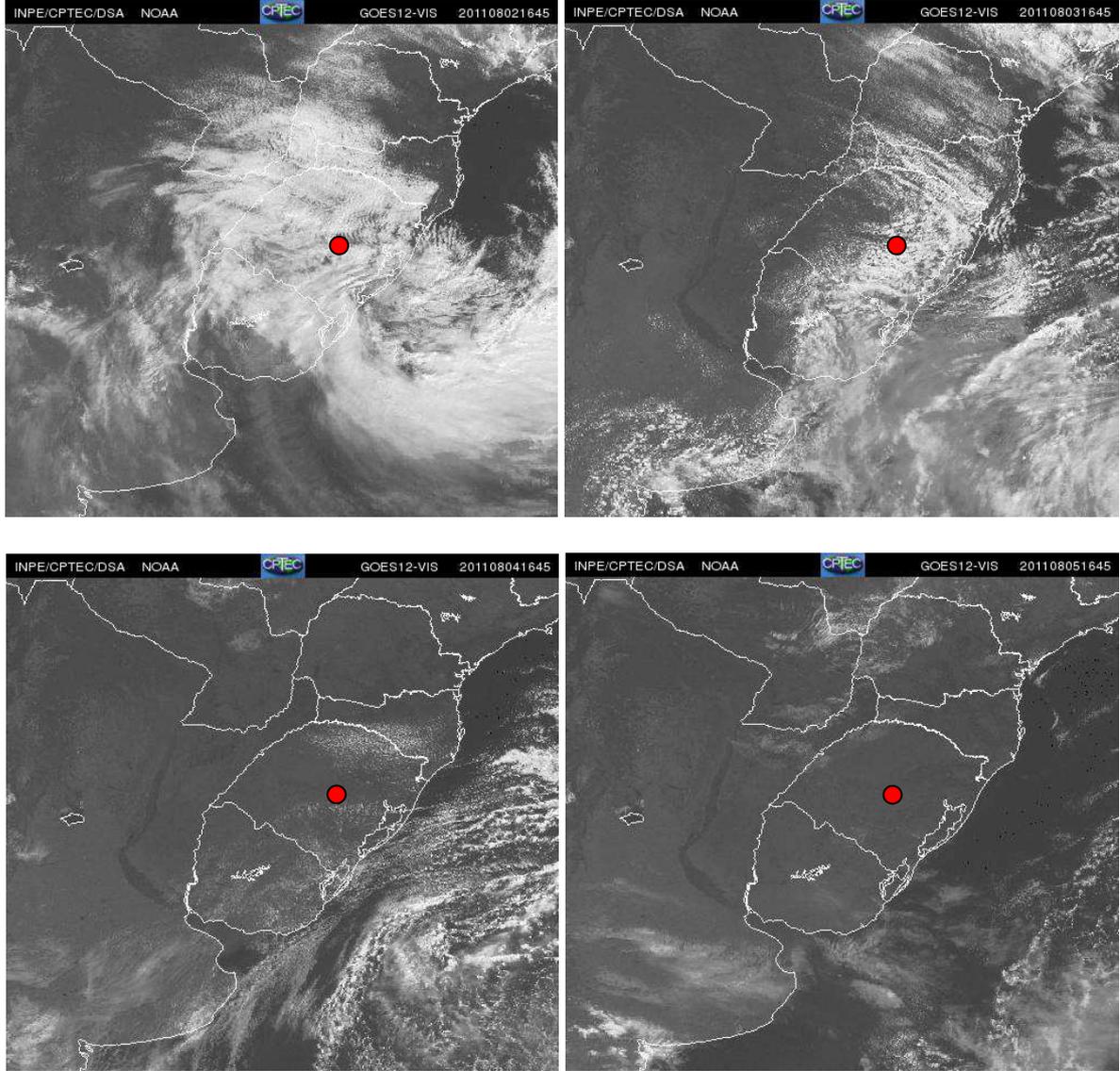
SERWAY R. A., JEWETT J. JR. **Physics for Scientists and Engineers**. Thomson Brooks/kole, 2003. p 1296.

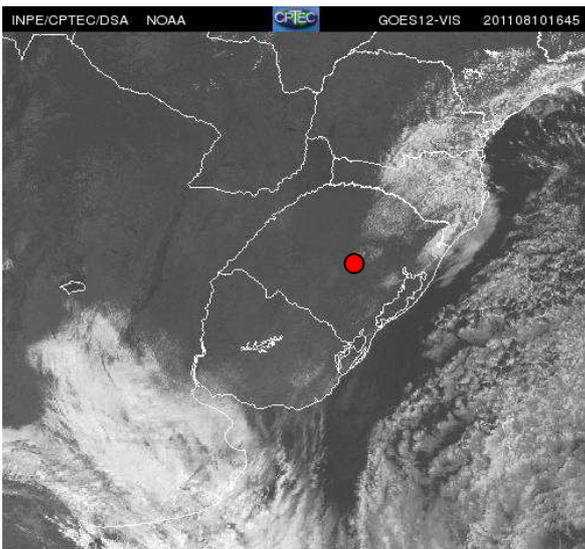
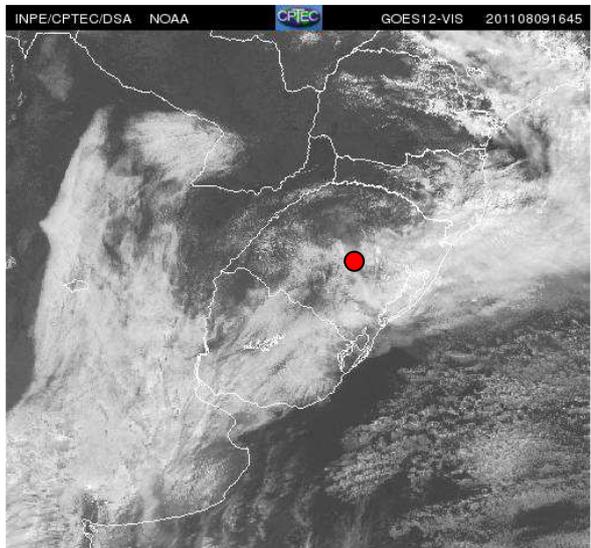
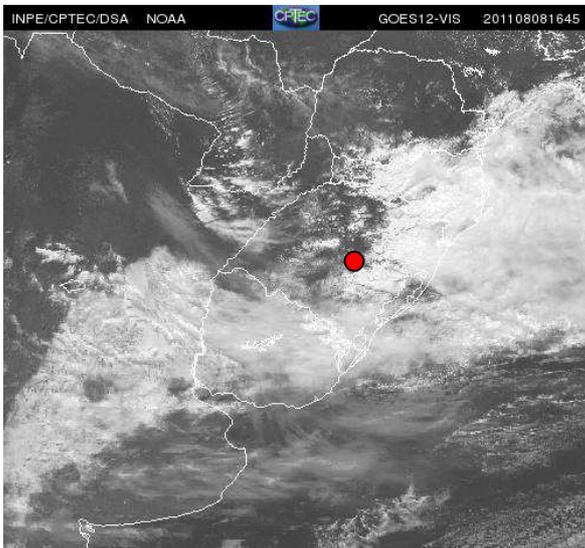
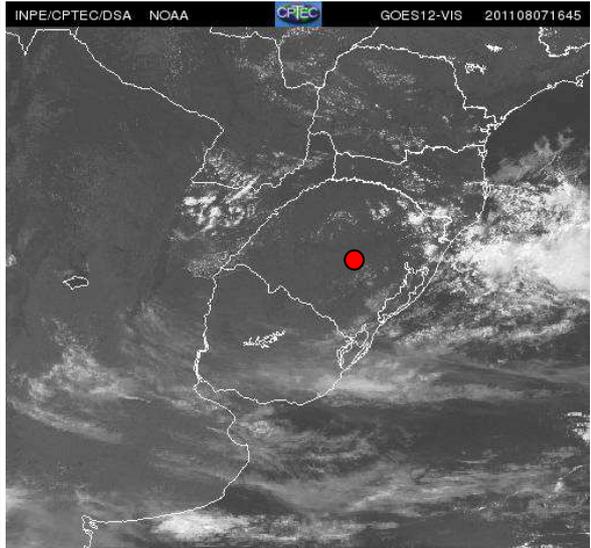
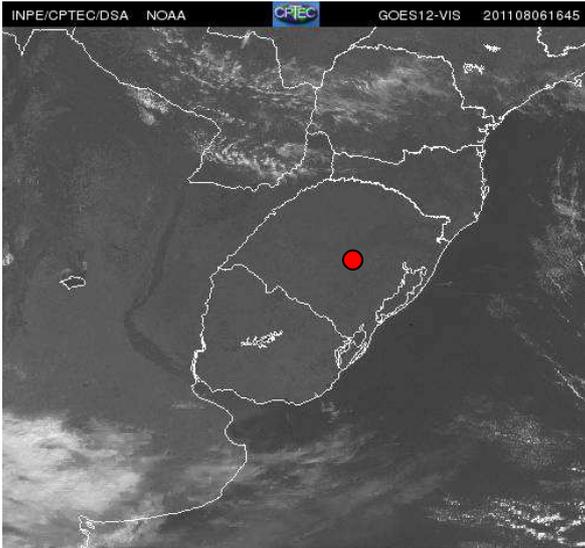
SENA J. C. et al. Análise das componentes do balanço energético numa lavoura de arroz irrigado. **Ciencia e Natura**. Disponível em <http://cascavel.ufsm.br/revista_ccne/ojs/index.php/cienciaenatura/issue/view/38>. Acesso em 01 jan. 2012.

TIMM A. U. **Estimativa Dos Fluxos De Energia Superficiais Utilizando O Modelo De Superfície Noah Modificado Para Culturas Alagadas**. 2011. 109 f. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

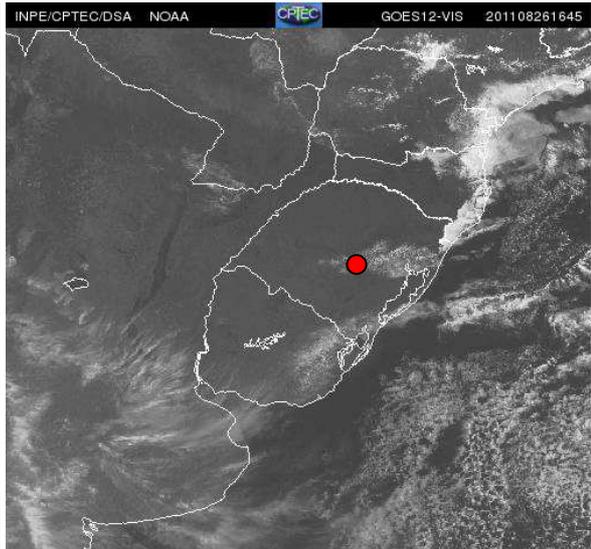
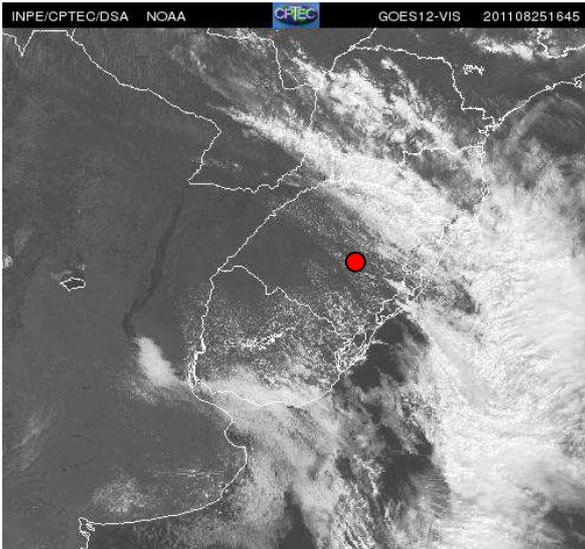
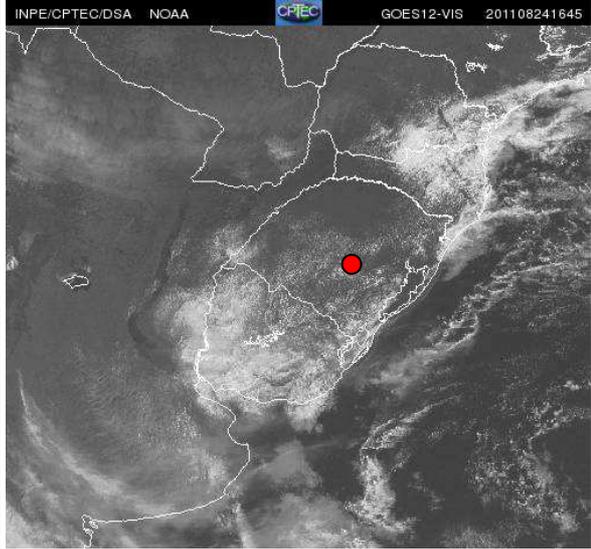
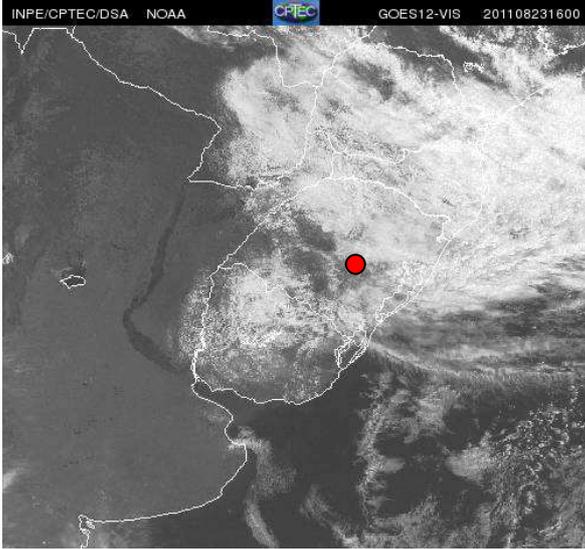
ZANCH F. B. et al. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. **ACTA AMAZONICA**. Rondônia, v.39, n. 2. p. 335-348, maio. 2009.

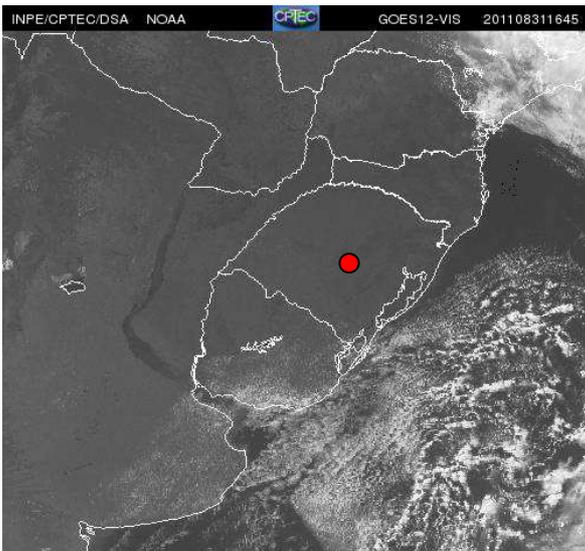
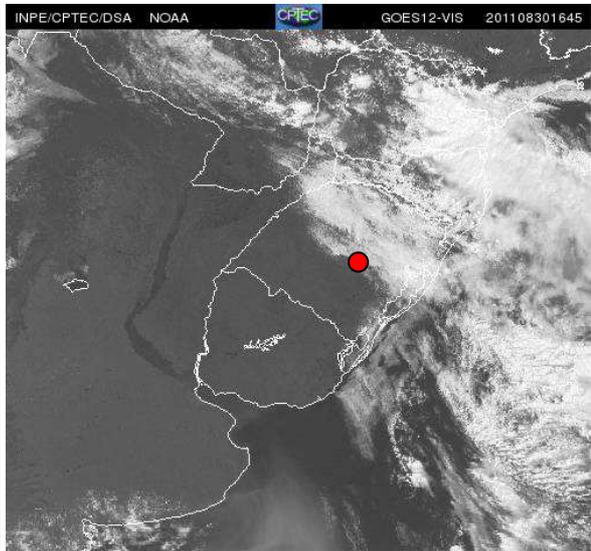
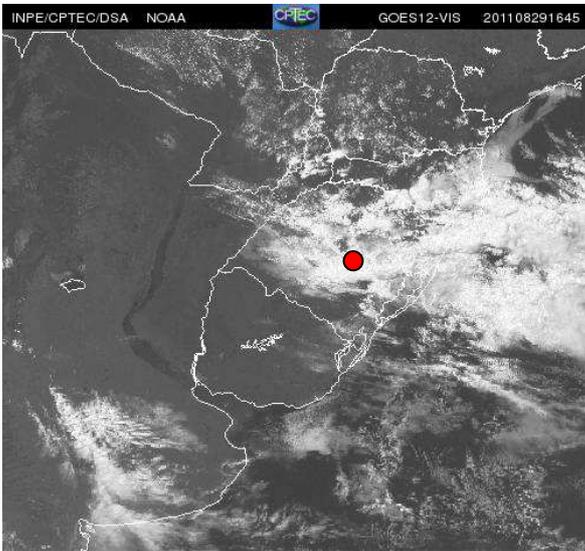
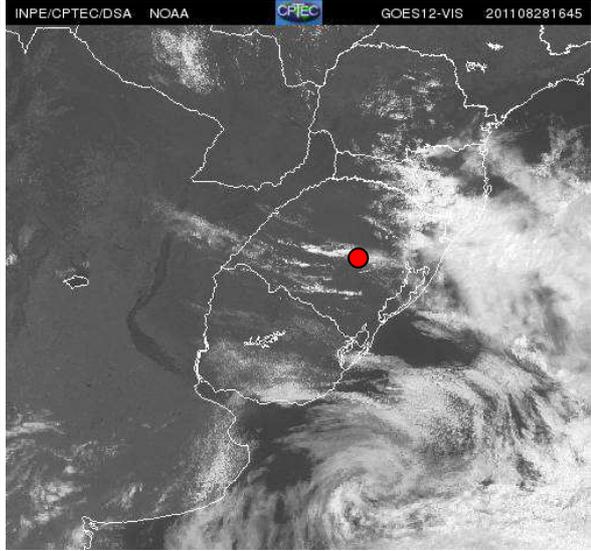
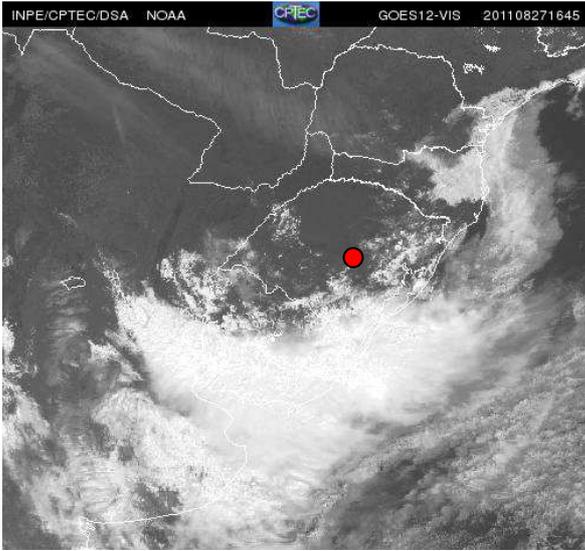
ANEXO A





ANEXO B





ANEXO C

