

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

**ESTIMATIVAS DAS TROCAS LÍQUIDAS DE
CARBONO EM DUAS ÁREAS DE CULTIVO DE
ARROZ IRRIGADO NA REGIÃO CENTRAL DO RS**

TESE DE DOUTORADO

Janaína Viário Carneiro

**Santa Maria, RS, Brasil
2012**

**ESTIMATIVAS DAS TROCAS LÍQUIDAS DE
CARBONO EM DUAS ÁREAS DE CULTIVO DE
ARROZ IRRIGADO NA REGIÃO CENTRAL DO RS**

por

Janaína Viário Carneiro

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Áreas Clássicas da Fenomenologia e Suas Aplicações, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutora em Física.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Luiz Leal de Moraes

Santa Maria, RS, Brasil

2012

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**ESTIMATIVAS DAS TROCAS LÍQUIDAS DE
CARBONO EM DUAS ÁREAS DE CULTIVO DE
ARROZ IRRIGADO NA REGIÃO CENTRAL DO RS**

elaborada por
Janaína Viário Carneiro

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutora em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

Oswaldo Luiz Leal de Moraes, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Otávio Costa Acevedo, Dr. (UFSM)

Débora Regina Roberti, Dra. (UFSM)

Anderson Sporh Nedel, Dr. (UFSM)

Nereu Augusto Streck, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 26 de julho de 2012.

*Ao meu pequeno grande amor,
minha filha Gabriela.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não é resultado apenas de um esforço individual. Ele se desenvolve de significativas contribuições durante a minha trajetória acadêmica e profissional. Em meio a isso, agradeço de maneira geral a todos que contribuíram para a realização desse trabalho. Mas não posso deixar de mencionar nominalmente aqueles, cuja contribuição foi inestimável e decisiva para a efetivação da Tese. Assim, mesmo correndo o risco de esquecer-me de alguém, quero registrar meu agradecimento especial:

- A Deus, por me dar força nos momentos mais difíceis. A me ensinar a superar qualquer desafio, seja ele o quão grande for.

- A minha amada filha, Gabriela, e ao meu marido, Robinson, por suportarem o meu estresse e entenderem que esta caminhada deveria ser em conjunto. Obrigada!

- Ao professor e meu orientador Osvaldo Luiz Leal de Moraes, que me proporcionou a oportunidade de integrar o grupo de pesquisas do Laboratório de Micrometeorologia, pela amizade e profissionalismo.

- A professora Débora Regina Roberti, por acompanhar o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo com suas opiniões nas discussões sobre o tema.

- À minha família, por compreender que nem sempre estaria presente ao lado deles, pois havia obrigações que deveria cumprir.

- A todos os professores do Laboratório de Micrometeorologia, que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

- Aos meus amigos do Laboratório. Esses anos de convivência ajudaram-me a compreender a veracidade de uma amizade. Ao Júlio, Daniel e Pablo pelo apoio nos trabalhos de campo.

- Em especial, aos meus amigos, Hans e Cláudio, pelas manifestações de companheirismo e de encorajamento.

- À Coordenação e funcionários do curso que sempre ajudaram a solucionar eventuais problemas que surgiram.

- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo suporte financeiro.

A todos o meu profundo agradecimento.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Física
Universidade Federal de Santa Maria

ESTIMATIVAS DAS TROCAS LÍQUIDAS DE CARBONO EM DUAS ÁREAS DE CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO NA REGIÃO CENTRAL DO RS

Autor: JANAÍNA VIÁRIO CARNEIRO
Orientador: OSVALDO LUIZ LEAL DE MORAES
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 26 de julho de 2012.

Os fluxos turbulentos de dióxido de carbono (CO_2) foram investigados em dois sítios de cultura de arroz irrigado no Sul do Brasil, utilizando a técnica de covariância de vórtices ao longo de 385 dias de análise no sítio de Paraíso do Sul e de 683 dias, no sítio de Cachoeira do Sul. Além disso, utilizou-se o modelo de preenchimento das lacunas com o objetivo de estimar a troca líquida de C- CO_2 no ecossistema (NEE). Ao longo do período de cultivo, os campos de arroz, tanto para o sítio de Paraíso do Sul quanto para o sítio de Cachoeira do Sul, atuaram como sumidouros de carbono (C). Durante os períodos de pousio, esses campos foram fontes de C. O NEE acumulado, no sítio de Cachoeira do Sul foi semelhante em ambos os ciclos e praticamente igual ao estimado no sítio de Paraíso do Sul. A GPP acumulada durante o ciclo de cultivo de 2010-2011, no campo de arroz de Cachoeira do Sul, foi inferior a 12% do ciclo de 2011-2012 e superior em 15% a do sítio de Paraíso do Sul. A R_e acumulada foi semelhante no sítio de Paraíso do Sul e no ciclo de 2010-2011 de Cachoeira do Sul, mas inferior a do ciclo de 2011-2012. Os valores de NEE, GPP e R_e para o sítio de Paraíso do Sul foram de $-270,53\text{gCm}^{-2}$, $-821,19\text{gCm}^{-2}$ e $527,59\text{gCm}^{-2}$, respectivamente. Para o sítio de Cachoeira do Sul, foram de $-282,53\text{gCm}^{-2}$, $-933,40\text{gCm}^{-2}$ e $597,05\text{gCm}^{-2}$ para NEE, GPP e R_e , respectivamente, no ciclo de 2010-2011. Para o ciclo de 2011-2012, no campo de arroz de Cachoeira do Sul, os valores de NEE, GPP e R_e foram de $-279,69\text{gCm}^{-2}$, $-1062,640\text{gCm}^{-2}$ e $716,58\text{gCm}^{-2}$, respectivamente. O total de C acumulado ao longo do período analisado para o sítio de Paraíso do Sul foi de $-45,90\text{gCm}^{-2}$, considerando esta área de cultivo de arroz, como um sumidouro de C. Enquanto que

a área de cultivo de Cachoeira do Sul foi considerada fonte de C ($19,94\text{gCm}^{-2}$). Mostrando com isso, que períodos longos de pousio contribuem consideravelmente para os fluxos acumulados devido a permanência constante de vegetação. A contribuição deste trabalho auxiliará na investigação das emissões de CO_2 nesses ecossistemas.

Palavras-chave: Troca líquida de CO_2 no ecossistema (NEE), Produção primária bruta (GPP), Respiração no ecossistema (R_e), Covariância de vórtices.

ABSTRACT

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Física
Universidade Federal de Santa Maria

ESTIMATES OF NET CARBON EXCHANGE IN TWO AREAS OF IRRIGATED RICE IN THE CENTRAL REGION OF THE RS.

Author: JANAÍNA VIÁRIO CARNEIRO

Adviser: OSVALDO LUIZ LEAL DE MORAES

Local and Date: Santa Maria, July 26th, 2012.

The turbulent fluxes of carbon dioxide (CO_2) were investigated in two sites of irrigated rice in southern Brazil, using the eddy covariance technique over 385 days of analysis at the site of Paraiso do Sul and 683 days in site Cachoeira do Sul also used the model of filling the gaps in order to estimate the net ecosystem exchange CO_2 -C (NEE). Throughout the growing season, rice fields, both for the site of Paraiso do Sul to the site of Cachoeira do Sul, acted as carbon sinks (C). During fallow periods, these fields were the source of C. The NEE accumulated at the site of Cachoeira do Sul was similar in both cycles and practically equal to the estimated site of Paraiso do Sul. The GPP accumulated during the crop cycle 2010-2011, the rice field of Cachoeira do Sul, was less than 12% of the 2011-2012 cycle and higher than 15% of the site of Paraiso do Sul. The R_e accumulated was similar at the site of Paraiso do Sul in the 2010-2011 cycle Cachoeira do Sul, but less than the 2011-2012 cycle. The values of NEE, GPP and R_e for the site of Paraiso do Sul were -270.53gCm^{-2} , -821.19gCm^{-2} and 527.59gCm^{-2} , respectively. To the site of Cachoeira do Sul, were $-282,53\text{gCm}^{-2}$, $-933,40\text{gCm}^{-2}$ and $597,05\text{gCm}^{-2}$ for NEE, GPP and R_e , respectively, in the 2010-2011 cycle. For the 2011-2012 cycle in the rice field of Cachoeira do Sul, the values of NEE, GPP and R_e were $-279,69\text{gCm}^{-2}$, $-1062,64\text{gCm}^{-2}$ and $716,58\text{gCm}^{-2}$, respectively. The total C accumulated over the period analyzed for the site of Paraiso do Sul was $-45,90\text{gCm}^{-2}$, considering this area of rice cultivation, as a sink for C. While the growing area of Cachoeira do Sul

was considered a source of C ($19,94 \text{ gCm}^{-2}$). Showing by this that long periods of fallow contribute significantly to the accumulated fluxes due to constant presence of vegetation. The contribution of this work will assist in the investigation of CO_2 in these ecosystems.

Keywords: Net ecosystem CO_2 exchange (NEE), gross primary production (GPP), ecosystem respiration (R_e), eddy covariance.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 2.1 - Lacuna criada no conjunto de dados (30 dias), para cada sítio experimental de cultura de arroz, para validar as equações empíricas utilizadas neste preenchimento. Ambos os sítios experimentais com lacunas de 8 dias. (a) sítio de Paraíso do Sul com lacuna de 10 janeiro 2004 a 17 janeiro 2004 (b) sítio de Cachoeira do Sul com lacuna de 24 dezembro 2010 a 31 dezembro 2010.....34
- FIGURA 2.2 - Preenchimento das lacunas utilizando as equações empíricas para o conjunto de dados selecionados (30 dias) para cada sítio experimental de cultura de arroz. Linha em preto, os dados observados e linha em azul os dados modelados. (a) Preenchimento da lacuna para o sitio de Paraíso do Sul. (b) Preenchimento da lacuna para o sitio de Cachoeira do Sul.....35
- FIGURA 3.1.1 - Localização do sítio de Paraíso do Sul – RS.....37
- FIGURA 3.1.2 - Local da torre micrometeorológica instalada no sítio experimental em Paraíso do Sul – RS. Torre micrometeorológica – lado direito na parte superior.....38
- FIGURA 3.1.3 - Sistema de covariância de vórtices (*eddy covariance*): anemômetro sônico e analisador de gás de caminho aberto – sítio de Paraíso do Sul.....38
- FIGURA 3.1.4 - Contribuição cumulativa normalizada (CNF) das medidas de fluxos para o período de cultivo do arroz (novembro de 2003 a abril de 2004) para o sítio de Paraíso do Sul.....40
- FIGURA 3.1.5 - Fluxograma de aquisição de dados, processamento e arquivamento para ambos os sítios experimentais (Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS)). O arquivo SFC armazena dados de superfície e radiação, FLX armazena dados de fluxos e STM armazena dados de temperatura e umidade do solo.....42

FIGURA 3.1.6 - Relação entre as médias de 30min do fluxo noturno de CO₂ e de σ_w para os 385 dias de coleta de dados no sítio de Paraíso do Sul. As cores indicam os intervalos definidos de σ_w a cada 0,1 ms⁻¹ com o correspondente fluxo de CO₂43

FIGURA 3.1.7 - Classificação do período diurno e noturno a partir da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), demonstrados em 7 dias de análise (dezembro de 2003)..... 44

FIGURA 3.1.8 - Fluxograma do preenchimento de dados para os sítios experimentais (Paraíso do Sul e Cachoeira do Sul).....45

FIGURA 3.2.1 - Localização do sítio de Cachoeira do Sul – RS.....47

FIGURA 3.2.2 - Local da torre micrometeorológica instalada no sítio experimental em Cachoeira do Sul – RS. Torre micrometeorológica – lado direito na parte inferior.....48

FIGURA 3.2.3 - Sistema de covariância de vórtices (*eddy covariance*): anemômetro sônico e analisador de gás de caminho aberto – sítio de Cachoeira do Sul.....48

FIGURA 3.2.4 - Contribuição cumulativa normalizada das medidas de fluxos para o período de cultivo do arroz (outubro de 2010 a março de 2011) para o sítio de Cachoeira do Sul.....50

FIGURA 3.2.5 - Relação entre as médias de 30min do fluxo noturno de CO₂ e de σ_w para o sítio de Cachoeira do Sul. Análise de dois anos consecutivos de coleta de dados (2010 a 2012). . As cores indicam os intervalos definidos de σ_w a cada 0,1 ms⁻¹ com o correspondente fluxo de CO₂51

FIGURA 3.2.6 - Classificação do período diurno e noturno a partir da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), demonstrados em 7 dias de análise (dezembro de 2010).....	52
FIGURA 3.2.7 - Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) para o sítio de Cachoeira do Sul. (a) medidas no ano 2010-2011 e (b) medidas no ano de 2011-2012.....	54
FIGURA 3.2.8 - Temperatura do ar para o sítio de Cachoeira do Sul. (a) representa as medidas de Tar para o ano 2010-2011 e (b) as medidas do ano de 2011-2012..	55
FIGURA 4.1.1 - Médias diárias das variáveis meteorológicas durante o período de estudo no sítio de Paraíso do Sul (julho de 2003 a julho de 2004). (a) temperatura do ar e (b) radiação fotossinteticamente ativa (PAR).....	58
FIGURA 4.1.2 - Valores médios mensais da temperatura do ar para o período de estudo (julho de 2003 a julho de 2004). As barras em preto indicam a média mensal da temperatura do ar no sítio de Paraíso do Sul (PS) a partir dos dados observacionais. Os pontos em vermelho indicam a normal climatológica da temperatura do ar para a estação do INMET de Santa Maria (SM), período de 1961-1990.....	58
FIGURA 4.1.3 - Valores acumulados mensais de precipitação durante o período de estudo (julho de 2003 a julho de 2004). As barras em preto indicam a precipitação acumulada no sitio de Paraíso do Sul (PS) a partir dos dados observacionais. Os pontos em vermelho indicam a normal climatológica da precipitação para a estação do INMET de Santa Maria (SM) período de 1961-1990.....	59
FIGURA 4.1.4 - Direção e velocidade média do vento durante o período de estudo (julho de 2003 a julho de 2004) para o sítio de Paraíso do Sul.....	59
FIGURA 4.1.5 - Direção e velocidade média do vento durante o período de cultivo do arroz (novembro de 2003 a março de 2004) para o sítio de Paraíso do Sul.....	60

FIGURA 4.1.6 – Índice de área foliar (IAF) durante o período de cultivo do arroz no sítio de Paraíso do Sul. As linhas verticais tracejadas separam as fases de desenvolvimento do arroz: VJ=vegetativa jovem, VA=vegetativa adulta, R=reprodutiva e M=maturação.....61

FIGURA 4.1.7 – Variações do ciclo médio diário dos intervalos de 30min de NEE e PAR para cada fase de desenvolvimento do arroz durante o período de cultivo para o sítio de Paraíso do Sul. (a) fase vegetativa jovem (VJ), (b) fase vegetativa adulta (VA), (c) fase reprodutiva, (d) fase de maturação.....63

FIGURA 4.1.8 - Médias diárias de NEE, GPP e R_e para o período de estudo no sítio de Paraíso do Sul (03 julho 2003 a 22 julho 2004). Os quadrados (vermelho) representam o NEE, os círculos (azul) a GPP e os triângulos (cinza) a R_e . As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz (P1 e P2).....65

FIGURA 4.1.9 - Total de C acumulado durante o período de cultivo do arroz no sítio de Paraíso do Sul (25 novembro 2003 a 04 abril 2004). Os quadrados (vermelho) representam o NEE, os círculos (azul) a GPP e os triângulos (cinza) a R_e66

Figura 4.1.10 - NEE total acumulado durante o período de estudo no sítio de Paraíso do Sul (03 julho 2003 a 22 julho 2004). As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz.....67

FIGURA 4.1.11 - NEE total acumulado para os períodos com e sem arroz no sítio de Paraíso do Sul (385 dias de análise).....67

FIGURA 4.2.1 - Médias diárias das variáveis meteorológicas a partir de dados observacionais durante o período de estudo no sítio de Cachoeira do Sul (junho de 2010 a março de 2012). (a) temperatura do ar e (b) radiação fotossinteticamente ativa (PAR).....70

FIGURA 4.2.2 - Valores médios mensais da temperatura do ar para o período de estudo (junho de 2010 a março de 2012). As barras em preto indicam a média mensal da temperatura do ar no sítio de Cachoeira do Sul (CS) a partir dos dados observacionais. Os pontos em vermelho indicam a normal climatológica da temperatura média do ar para a estação do INMET de Santa Maria (SM), período de 1961-1990.....70

Figura 4.2.3 - Valores acumulados mensais para a precipitação durante o período de estudo (junho de 2010 a março de 2012). As barras em preto indicam a precipitação acumulada no sítio de Cachoeira do Sul (CS) a partir dos dados observacionais. Os pontos em vermelho indicam a normal climatológica da precipitação para a estação do INMET de Santa Maria (SM), período de 1961-1990.....71

FIGURA 4.2.4 - Direção e velocidade média do vento durante o período de estudo (junho de 2010 a março de 2012) para o sítio de Cachoeira do Sul.....71

FIGURA 4.2.5 - Direção e velocidade média do vento durante o período de cultivo do arroz (outubro de 2010 a março de 2011) para o sítio de Cachoeira do Sul.....72

FIGURA 4.2.6 - Índice de área foliar (IAF) para os dois anos de cultivo do arroz no sítio de Cachoeira do Sul. Os círculos em preto indicam as medidas do IAF para o período de cultivo do arroz no ano 2010-2011 e os círculos em vermelho, para o ano 2011-2012. As linhas verticais tracejadas (preto=2010-2011, vermelho=2011-2012) separam as fases de desenvolvimento do arroz: VJ=vegetativa jovem, VA=vegetativa adulta, R=reprodutiva e M=maturação.....73

FIGURA 4.2.7 - Altura da planta de arroz para os dois anos de coleta de dados no sítio de Cachoeira do Sul. Os círculos em preto indicam as medidas da altura para o período de cultivo do arroz no ano 2010-2011 e os círculos em vermelho, para o ano 2011-2012. As linhas verticais tracejadas (preto=2010-2011, vermelho=2011-2012) separam as fases de desenvolvimento do arroz: VJ=vegetativa jovem, VA=vegetativa adulta, R=reprodutiva e M=maturação.....74

FIGURA 4.2.8 - Variações do ciclo médio diário dos intervalos de 30min de NEE e PAR para cada fase de desenvolvimento do arroz durante o período de cultivo no ano 2010-2011 para o sítio de Cachoeira do Sul. (a) fase vegetativa jovem (VJ), (b) fase vegetativa adulta (VA), (c) fase reprodutiva, (d) fase de maturação.....76

FIGURA 4.2.9 - Variações do ciclo médio diário dos intervalos de 30min de NEE e PAR para cada fase de desenvolvimento do arroz durante o período de cultivo no ano 2011-2012 para o sítio de Cachoeira do Sul. (a) fase vegetativa jovem (VJ), (b) fase vegetativa adulta (VA), (c) fase reprodutiva, (d) fase de maturação.....77

FIGURA 4.2.10 - Médias diárias de NEE, GPP e R_e para o período de estudo no sítio de Cachoeira do Sul (01 junho 2010 a 25 março 2012). Os quadrados (vermelho) representam o NEE, os círculos (azul) a GPP e os triângulos (cinza) a R_e . As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz.....79

FIGURA 4.2.11 - Total de C acumulado para o período de cultivo do arroz no sítio de Cachoeira do Sul (2010-2011: 20 outubro 2010 a 16 março 2011, 2011-2012: 06 outubro 2011 a 17 março 2012). Os quadrados representam o NEE de 2010-2011 (vermelho) e 2011-2012 (rosa), respectivamente. Os círculos representam a GPP de 2010-2011 (azul escuro) e 2011-2012 (azul claro). Os triângulos representam a R_e de 2010-2011 (preto) e 2011-2012 (cinza).....80

FIGURA 4.2.12 - NEE total acumulado para o período de estudo no sítio de Cachoeira do Sul (01 junho 2010 a 25 março 2012). As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz.....81

Figura 4.2.13 - NEE total acumulado para os períodos com e sem arroz no sítio de Cachoeira do Sul (683 dias de análise).....81

FIGURA 5.1 - Médias diárias de NEE para os dois sítios de estudo, na região central do RS. Os triângulos (preto) representam o NEE de Paraíso do Sul (PS) para o ano de 2003-2004, triângulos (azul) NEE de Cachoeira do Sul (CS) para o ano de 2010-2011 e os triângulos (vermelho) NEE de Cachoeira do Sul (CS) para o ano de 2011-2012. As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz (preto - PS, azul - CS-2010-2011, vermelho - CS-2011-2012).....84

FIGURA 5.2 - Médias diárias de GPP e R_e para os dois sítios de estudo, na região central do RS. Os círculos representam a GPP e os triângulos a R_e . Em preto têm-se os dados observacionais de Paraíso do Sul para o ano de 2003-2004, em azul e vermelho, os dados observacionais de Cachoeira do Sul, para o ano de 2010-2011 e de 2011-2012, respectivamente. As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz (preto - PS, azul - CS-2010-2011, vermelho - CS-2011-2012).....85

FIGURA 5.3 - Total acumulado de NEE, GPP e R_e para o período de cultivo do arroz nos sítios experimentais de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS).....87

FIGURA 5.4 - Total acumulado de NEE, GPP e R_e para o período de pousio nos sítios experimentais de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS).....87

FIGURA 5.5 - Total acumulado de NEE, GPP e R_e para período completo de análise nos sítios experimentais de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS).....89

FIGURA 5.6 - Total acumulado de NEE para período completo de análise nos sítios experimentais de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS). Os círculos em preto representam PS e os círculos em vermelho representam CS. As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz (preto - PS, vermelho - CS).....89

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1.1 – Medidas adicionais, sensores e altura dos sensores no sítio de Paraíso do Sul.....	39
TABELA 3.2.1 – Medidas adicionais, sensores e altura dos sensores no sítio de Cachoeira do Sul.....	49
TABELA 5.1 - Total acumulado de C nos sítios de nosso estudo durante o período de cultivo do arroz.....	88

SUMÁRIO

1	Introdução	20
2	Metodologia.....	22
2.1	Fluxos turbulentos.....	22
2.1.1	Definição matemática.....	23
2.1.2	Equação para os fluxos turbulentos	25
2.1.3	Medidas de fluxos turbulentos.....	25
2.2	Correção de Webb.....	27
2.3	Separação do NEE em GPP e R_e	27
2.4	Método de preenchimento de dados.....	30
3	Descrição dos Sítios Experimentais e Dados Utilizados	36
3.1	Sítio de Paraíso do Sul	36
3.1.1	Descrição do sítio.....	36
3.1.2	Footprint das medidas de fluxo	39
3.1.3	Medidas de fluxos de CO_2	40
3.1.4	Filtros utilizados nas medidas de fluxos de CO_2	42
3.1.5	Preenchimento dos dados de fluxos de CO_2	44
3.1.6	Índice de área foliar	45
3.2	Sítio de Cachoeira do Sul	46
3.2.1	Descrição do sítio.....	46
3.2.2	Footprint das medidas de fluxo	49
3.2.3	Medidas de fluxos de CO_2	50
3.2.4	Filtros utilizados.....	50
3.2.5	Preenchimento das lacunas	52
3.2.6	Índice de área foliar	55
4	Resultados	56
4.1	Paraíso do Sul	56
4.1.1	Condições ambientais	56
4.1.2	Índice de área foliar (IAF).....	60
4.1.3	Fluxos de dióxido de carbono.....	61
4.2	Cachoeira do Sul	68
4.2.1	Condições ambientais	68
4.2.2	Índice de área foliar (IAF).....	72
4.2.3	Fluxos de dióxido de carbono.....	74
5	Análise dos Sítios Experimentais	82
5.1	Variações diárias de NEE, GPP e R_e	82
5.2	Acumulado de NEE, GPP e R_e	85
6	Conclusões e Recomendações.....	90
	Referências Bibliográficas.....	92

Capítulo 1

1 Introdução

O arroz, um dos principais cereais consumidos pela população mundial, ocupa anualmente uma área de cerca de 150 milhões de hectares com produção aproximada de 590 milhões de toneladas. O Brasil se encontra entre os dez maiores produtores de arroz no mundo, com cerca de 13 milhões de toneladas produzidas anualmente em 2,8 milhões de hectares (CONAB, 2011 – safra 2010-2011). No Brasil, aproximadamente 62% da produção de arroz provêm de cultivo irrigado, na qual se destaca o estado do Rio Grande do Sul (RS), responsável por 60% da produção nacional. Até o final do século XIX, a produção de arroz no Brasil, foi exclusivamente de lavouras de sequeiro. Na última década do século, surgiram as primeiras lavouras de arroz irrigado por inundação, com destaque para a Região Sul do Brasil (Séries Culturas: Arroz, 2002). Essa contínua inundação da lavoura favorece a produtividade, que atinge em média 7.000 kg ha^{-1} (CONAB, 2011).

Nos últimos anos os ecossistemas agrícolas estão ganhando destaque nas observações de trocas de carbono, pois áreas agrícolas podem desempenhar um papel importante no ciclo de carbono terrestre (Campbell et al., 2001; Suyker et al., 2005). As lavouras de arroz irrigado por inundação têm importante função nas trocas globais de gases de efeito estufa, tais como o CO_2 e CH_4 , onde o primeiro é absorvido e o segundo é emitido para a atmosfera (Neue e Sass, 1994; Miyata et al., 2000). Mudanças no uso da terra também afetam o balanço de carbono, água e energia (Sakai et al. 2004; Zhao et al., 2008), e práticas de manejo das culturas, como, adubação, manejo de água, tratamento dos resíduos de colheita e plantio, influenciam nas trocas de carbono entre o campo de arroz e a atmosfera (Saito et al., 2005).

Estudos em lavouras de arroz, vêm sendo realizados com medidas micrometeorológicas de fluxos de dióxido de carbono (CO_2), sendo o método de covariância de vórtices a técnica mais utilizada desde 1980 (por exemplo, Ohtaki, 1984; Tsukamoto, 1993; Miyata et al., 2000). Esses estudos utilizaram medidas de CO_2 a curto prazo (alguns dias ou semanas). Medidas de fluxos de CO_2 a longo

prazo, em lavouras de arroz, foram relatadas por Campbell et al.(2001) (2 ciclos da cultura no Texas), Saito et al. (2005) (período de cultivo no Japão), Nishimura et al.(2008) (2 ciclos de cultivo no Japão) e Alberto et al. (2009) (período de cultivo nas Filipinas). No Brasil, medidas de fluxos de CO_2 foram realizadas no norte do país (Sakai et al., 2004) para estimar o CO_2 acumulado na cultura de arroz não irrigado.

Para entender melhor o atual (e futuro) papel do ciclo de carbono, precisa-se quantificar a longo prazo, as trocas de CO_2 também em áreas de cultivo com arroz, uma vez que o arroz é cultivado frequentemente em solos mal drenados onde outras culturas agrícolas são pouco cultivadas. Com este intuito, buscou-se estimar o NEE em áreas de cultivo de arroz na Região Sul do Brasil, onde o estado do RS é o maior produtor nacional. Apresentou-se contínua observação em dois sítios experimentais de cultivo de arroz irrigado. Os dados coletados, no sítio de Paraíso do Sul, foram parte do projeto CT-HIDRO, durante um ano de coleta de dados. Os dados do sítio de Cachoeira do Sul, foram de medidas contínuas da rede de monitoramento de fluxos (Rede Sulflux), durante praticamente dois anos de coleta de dados. Depois de preencher as lacunas no conjunto de dados observacionais, os fluxos foram integrados, a cada meia hora, para investigar o papel da lavoura de arroz como um sumidouro ou fonte de carbono ao longo do período analisado.

Capítulo 2

2 Metodologia

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada para o cálculo dos fluxos turbulentos de dióxido de carbono (CO_2), assim como a correção aplicada a esses fluxos devido às variações na densidade do ar. Também, define-se o método utilizado para preencher as lacunas obtidas no conjunto de dados para cada sítio experimental do estudo.

2.1 Fluxos turbulentos

A região da atmosfera que é diretamente influenciada pela superfície terrestre, e que nos permite analisar grandezas como: vento, temperatura, umidade e concentração de gases, conhecida como Camada Limite Planetária (CLP). Esta camada é caracterizada por movimentos turbulentos gerados por forçantes mecânicos e térmicos. Durante o dia, com o aquecimento da superfície e os movimentos convectivos, a profundidade da CLP aumenta continuamente até um valor máximo em torno de 1 a 2 Km. À noite, com o esfriamento radiativo da superfície que proporciona o enfraquecimento da turbulência, a altura desta camada torna-se bem mais rasa. A CLP que se desenvolve durante o dia é denominada de Camada Limite Convectiva (CLC) e a que se desenvolve durante a noite é denominada de Camada Limite Estável (CLE).

Os movimentos da CLP são quase sempre turbulentos. A importância da turbulência atmosférica é o fato de que esta representa um processo efetivo de transporte. Turbulência é o movimento aparentemente caótico que se manifesta de forma irregular em flutuações aleatórias na velocidade, temperatura e concentração de escalares em torno de um valor médio. Esses valores médios variam em função da altura na região acima do solo, esta região é conhecida como Camada Limite Superficial (CLS).

A superfície terrestre é dominada pela turbulência, desta forma, entender os fenômenos de transporte próximos à superfície, nos remete a uma caracterização

dos fluxos turbulentos. É nela que se originam quantidades como dióxido de carbono, vapor de água, poluentes e outros escalares.

As equações que governam o escoamento na atmosfera, são as equações de Navier-Stokes e equações de conservação de massa e energia. Essas equações são equações diferenciais parciais, não lineares e acopladas, e constituem um sistema fechado sem solução analítica. Nosso interesse está no estado médio da atmosfera, e para isso utilizam-se equações para as variáveis médias a partir destas equações. Equações para as variáveis médias permanecem não lineares, acopladas e agora constituem um sistema não fechado. Os termos adicionais que surgem desse sistema derivado, possuem as informações de como a superfície interage com a atmosfera, e assim são denominados de fluxos turbulentos.

A técnica utilizada para quantificar o saldo de transferência de grandezas escalares resultantes do ciclo diário dos fluxos turbulentos é a covariância de vórtices (*eddy covariance* - EC). Essa técnica permite observar diretamente o escalar (em nosso caso, o CO_2) e seu movimento vertical com medidas de longo prazo.

2.1.1 Definição matemática

Considerando a concentração de um escalar c que se conserva na atmosfera:

$$\frac{dc}{dt} = 0 \quad (2.1)$$

Expandindo a diferencial total:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Onde u, v e w representam as componentes do campo de velocidade. O primeiro termo na equação (2.2) representa a variação local de c e os demais termos representam o transporte de c em cada uma das direções pelas componentes do vento.

Considerando as médias de Reynolds, onde os valores de qualquer grandeza podem ser decompostos em um termo médio e outro termo que flutua em torno dessa média, teremos:

$$\begin{aligned}c &= \bar{c} + c' \\u &= \bar{u} + u' \\v &= \bar{v} + v' \\w &= \bar{w} + w'\end{aligned}\tag{2.3}$$

Substituindo as equações (2.3) em (2.2), a equação é reescrita como:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} - \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} - \overline{u' \frac{\partial c'}{\partial x}} - \overline{v' \frac{\partial c'}{\partial y}} - \overline{w' \frac{\partial c'}{\partial z}}\tag{2.4}$$

Os três primeiros termos do lado direito da equação (2.4) representam o transporte da parte média de c pelo vento médio, os três últimos termos do lado direito da equação (2.4) também são transporte advectivos, porém da componente turbulenta de c pelo campo turbulento do vento.

Na CLP, o escoamento é não divergente, ou seja:

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0\tag{2.5}$$

Multiplicando a equação (2.5) por c' , aplicando as regras das médias de Reynolds e somando na equação (2.4), tem-se:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} - \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{u' c'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v' c'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w' c'}}{\partial z}\tag{2.6}$$

onde os termos $\overline{u' c'}$, $\overline{v' c'}$ e $\overline{w' c'}$ são os fluxos turbulentos de c nas direções x, y e z, respectivamente.

2.1.2 Equação para os fluxos turbulentos

Algumas hipóteses devem ser consideradas para a simplificação da equação (2.6). A primeira hipótese é que se adote um sistema de coordenadas que esteja alinhado com a direção do vento médio e a segunda é que a turbulência seja horizontalmente homogênea, ou seja, é possível se a superfície for plana. Logo, a equação que descreve a concentração do escalar é dada por:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -Adv - \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} + S \quad (2.7)$$

em que o termo Adv representa a advecção pelo vento médio e o termo S representa fontes e sumidouros. Na ausência de fontes externas e condições de pouco vento, a equação (2.7) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = - \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} \quad (2.8)$$

A equação (2.8) indica a importância dos fluxos verticais turbulentos. São eles, em condições ideais, os únicos responsáveis pela evolução do estado médio da CLP. E também, esta equação indica que o que afeta diretamente os campos médios são as suas divergências.

2.1.3 Medidas de fluxos turbulentos

A técnica mais utilizada para o cálculo dos fluxos turbulentos é a covariância de vórtices (EC). Esta técnica permite determinar o fluxo vertical do escalar, da temperatura do ar (fluxo de calor sensível) e da umidade do ar (fluxo de calor latente), utilizando o cálculo da correlação entre os desvios temporais de alta frequência da velocidade vertical do vento com os desvios temporais do escalar.

O fluxo de uma grandeza escalar c na atmosfera pode ser escrito como:

$$F_c = \overline{wc} \quad (2.9)$$

onde w é a componente vertical da velocidade do vento, c é a concentração do escalar. A barra acima do termo à direita, representa a média do produto destas variáveis em um determinado intervalo de tempo. Nos estudos de turbulência atmosférica é comum decompor essas variáveis em uma componente média e outra turbulenta (Baldocchi et al., 1988; Moncrieff et al., 1997), esta decomposição (conhecida como decomposição de Reynolds).

Segundo Oke (1987), o valor médio de w é nulo em local plano, suficientemente extenso e geometricamente uniforme, não existindo escoamento preferencialmente vertical e porque, em um local, a massa de ar ascendente iguala a massa de ar descendente durante um intervalo de tempo razoável, assim o fluxo turbulento de uma grandeza escalar c pode ser expresso como:

$$F_c = \overline{w'c'} \quad (2.10)$$

onde w' representa a variação da componente vertical da velocidade do vento em relação à sua média, c' representa a variação da componente do escalar c em relação à sua média, e a barra horizontal sobre o produto caracteriza a covariância entre w' e c' .

Desta maneira, o fluxo turbulento de CO_2 pode ser expresso, da seguinte forma:

$$F_c = \overline{w'CO_2'} \quad (2.11)$$

Na aplicação do método de covariância de vórtices é necessária uma adequada rotação de coordenadas, para minimizar efeitos nas covariâncias (covariância entre duas variáveis é a média do produto da perturbação de cada uma dessas variáveis em relação a sua média, Moraes e Acevedo, 2004) devido à mínima inclinação topográfica que possa ter no sítio experimental. Para a média das componentes da velocidade do vento ou de covariâncias que incluam grandezas

escalares são realizadas duas sucessivas rotações. A primeira, alinha a componente u com o eixo x, realizada no plano em torno do eixo z, para anular a componente v. A segunda anula a componente w, realizada em torno do eixo y.

2.2 Correção de Webb

Correções são aplicadas aos dados brutos, com a intenção de se obter dados corretos, usando o método de covariância de vórtices. O fluxo vertical total do constituinte do ar inclui o fluxo vertical turbulento, assim como o fluxo vertical médio, que é o transporte vertical causado pelo fluxo médio vertical. Desta maneira, o movimento turbulento que consiste em parcelas de ar ascendentes e descendentes, as quais têm densidades diferentes (parcelas de ar ascendentes são menos densas que as descendentes), deve ter uma velocidade vertical média que seja diferente de zero. Desta maneira, o fluxo turbulento obtido pelo método de covariância de vórtices deve ser corrigido para obter-se um fluxo total a partir da equação (2.10).

Com este objetivo Webb et al. (1980) apresentaram uma teoria para esclarecer os efeitos das flutuações das densidades induzidas por fluxos de calor e vapor de água nas medidas de fluxos turbulentos de constituintes do ar:

$$F_c = \overline{w'CO_2'} + \frac{m_d}{m_w} \frac{\rho_c}{\rho_d} \overline{w'\rho_w'} + \left(1 + \frac{\rho_w}{\rho_d} \frac{m_d}{m_w} \right) \frac{\rho_c}{T} \overline{w'T'} \quad (2.12)$$

onde o sub-índice “d” refere-se ao ar seco e o sub-índice “w” ao vapor de água, m_w é massa do vapor de água (18 gmol^{-1}), m_d é massa do ar seco ($28,96 \text{ gmol}^{-1}$).

2.3 Separação do NEE em GPP e R_e

A troca líquida de CO_2 no ecossistema (do inglês *Net Ecosystem Exchange - NEE*) é a diferença entre o CO_2 absorvido da atmosfera pela planta, durante o processo de fotossíntese, e o perdido pelo processo de respiração (Wohlfahrt et al., 2005). O NEE pode ser diretamente quantificado através de medidas

micrometeorológicas, usando a técnica de covariância de vórtices. Esta técnica utiliza medidas de alta frequência da velocidade vertical do vento e da concentração de CO_2 .

O NEE é calculado pela soma dos fluxos de CO_2 , medidos pelos sensores fixados acima da copa das plantas e pelo armazenamento na camada abaixo (Lee, 1998):

$$NEE = F_c + \text{armazenamento} \quad (2.13)$$

onde F_c é o fluxo de CO_2 , medido pelo sistema de covariância e o armazenamento é a integração vertical ao longo do tempo da concentração de CO_2 , na janela escolhida para o cálculo do fluxo turbulento (30min). Usualmente, o armazenamento de CO_2 é verificado utilizando analisadores de gás infravermelho abaixo da copa das plantas, ou seja, abaixo do ponto onde se encontram os sensores de EC. A estimativa do armazenamento é mais utilizada em sítios florestais, devido à altura existente (extensa) entre o nível de observação e a superfície. Papale e Valentini (2003), fizeram uma primeira estimativa do sequestro de carbono pelas florestas européias, a partir da integração dos dados de NEE.

A técnica EC, apesar de ser utilizada com muita frequência, apresenta deficiências no que diz respeito a condições estáveis (ventos calmos), o que pode provocar uma subestimação nos fluxos de CO_2 , no período noturno (Goulden et al., 1996; Aubinet et al., 2000, 2002). Atualmente, aplica-se uma correção empírica nas medidas de fluxos de CO_2 noturno para tentar compensar a subestimação dessas medidas (Goulden et al., 1996; Falge et al., 2001).

Em nosso estudo, os dados de NEE são as medidas dos fluxos de CO_2 a cada 30min para o período total analisado. No entanto, o armazenamento foi negligenciado para o cálculo do NEE, uma vez que só tínhamos um sistema de covariância de vórtices para cada um dos sítios experimentais. Além disso, em situações de baixa velocidade do vento, o fluxo turbulento chega próximo de zero durante o período noturno. Por esta razão, para períodos noturnos com vento calmo, utilizou-se a filtragem do σ_w (descrita no próximo capítulo) e a equação empírica da

respiração para substituir os dados de fluxos de CO_2 , que poderiam subestimar o NEE noturno. Assim, usou-se apenas o fluxo medido pelo sistema experimental:

$$NEE = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i f_{ij} \quad (2.14)$$

onde f_{ij} é a média do fluxo diário de CO_2 .

O NEE pode ser particionado em produção primária bruta (do inglês *Gross Primary Production - GPP*) e respiração do ecossistema (do inglês *Ecosystem Respiration - R_e*). GPP é definida como a assimilação de CO_2 pela fotossíntese. A fotossíntese é essencial ao crescimento e desenvolvimento das plantas clorofiladas, que utilizam energia luminosa (captada pelos cloroplastos – organelas localizadas na folha) para transformar quimicamente o CO_2 da atmosfera (que entra na folha pelos estômatos) em substâncias ricas em energia, os açúcares (essenciais ao crescimento da planta). Como subproduto da fotossíntese há um desprendimento de oxigênio proveniente da água em quantidade proporcional ao CO_2 assimilado. Tem-se como um processo inverso ao da fotossíntese, a respiração. No processo de respiração, o oxigênio é absorvido da atmosfera para que os açúcares sejam convertidos em energia usada no crescimento e manutenção da planta. Em síntese, o processo de fotossíntese depende da energia solar, na qual as plantas capturam CO_2 da atmosfera durante o dia, e libera CO_2 para a atmosfera durante a noite, em um processo denominado respiração. É importante salientar que as plantas, durante o dia, não deixam de respirar, pois a atividade fotossintética é maior que a respiratória neste período.

Assim, durante o período diurno, tem-se o processo fotossintético e o respiratório das plantas, o $NEE_{(D)}$ é a soma de $GPP_{(D)}$ e $R_{e(D)}$:

$$NEE_{(D)} = GPP_{(D)} + R_{e(D)} \quad (2.15)$$

Para o período noturno, não ocorre a assimilação de CO_2 pela planta, e pode-se assumir que $GPP = 0$:

$$NEE_{(N)} = R_{e(N)} \quad (2.16)$$

Em micrometeorologia, fluxos negativos ($NEE < 0$) representam absorção de CO_2 pelo ecossistema e uma perda de CO_2 da atmosfera, enquanto os fluxos positivos ($NEE > 0$) representam o efluxo de CO_2 do ecossistema para a atmosfera. Assim a GPP, é sempre negativa, e R_e é sempre positiva.

2.4 Método de preenchimento de dados

Para preencher lacunas obtidas devido a dados faltantes por problemas ocorridos durante o armazenamento dos dados e também após a utilização de filtros, separou-se essas lacunas de três maneiras: para lacunas de até 2 horas, usou-se interpolação simples. Para lacunas maiores que 2 horas e menores que 4 dias, utilizou-se o método da variação diurna média (do inglês *Mean Diurnal Variation* – MDV) (Falge et al., 2001). Esse método preenche a lacuna de um determinado horário, utilizando a média de 7 dias sucessivos, para o mesmo horário. Para lacunas maiores que 4 dias, utilizou-se as funções empíricas de variáveis meteorológicas para estimar o GPP e a R_e durante o dia (Falge et al., 2001, Lasslop et al., 2010).

Durante o período noturno, $NEE_{(N)}$ é igual a R_e ($R_{e(N)}$) assumindo que $GPP = 0$. A $R_{e(N)}$ é uma função exponencial, que depende da temperatura do ar e é representada pela seguinte equação:

$$R_{e(N)} = r_b \exp \left[E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{ar} - T_0} \right) \right] \quad (2.17)$$

onde r_b é a respiração na temperatura de referencia ($\mu mol Cm^{-2} s^{-1}$), E_0 é a temperatura de sensibilidade ($^{\circ}C$), T_{ar} é a temperatura do ar ($^{\circ}C$), $T_{ref} = 15^{\circ}C$ e $T_0 = -46,02^{\circ}C$, obtidos de Lloyd & Taylor (1994). Os valores de r_b e E_0 são definidos a partir da curva entre $R_{e(N)}$ e T_{ar} noturna.

Para determinar r_b e E_0 , lineariza-se a equação (2.17) (Goergen et al., 2010). Tomando o logaritmo natural (neperiano, \ln) em ambos os lados da equação (2.17), tem-se:

$$\ln R_{e(N)} = \ln(r_b) + E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} \right) - E_0 \left(\frac{1}{T_{ar} - T_0} \right) \quad (2.18)$$

Assumindo que a equação (2.18) seja:

$$\ln R_{e(N)} = AZ + B \quad (2.19)$$

em que:

$$B = \ln(r_b) + E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} \right),$$

$$A = -E_0$$

$$\text{sendo: } Z = \left(\frac{1}{T_{ar} - T_0} \right)$$

Assim obtêm-se os valores das constantes r_b e E_0 , em que:

$$E_0 = -A$$

$$r_b = e^{\left(B - \frac{E_0}{T_{ref} - T_0} \right)}$$

Durante o dia, em que o ecossistema realiza fotossíntese, a GPP é assumida como a diferença entre o NEE e a $R_{e(D)}$, ou seja:

$$GPP = NEE_{(D)} - R_{e(D)} \quad (2.20)$$

Para estimar o GPP usa-se a equação hiperbólica retangular (Falge et al., 2001), que utiliza a radiação fotossinteticamente ativa (PAR):

$$GPP = \frac{\alpha\beta PAR}{\alpha PAR + \beta} \quad (2.21)$$

onde α é a eficiência da utilização de luz pelo dossel e representa a inclinação inicial da curva de resposta de luz (μmolCJ^{-1}) e β é a taxa máxima de CO_2 absorvida pelo dossel na saturação de luz ($\mu\text{molCm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Conforme Goergen et al. (2010), fazendo-se o inverso da eq.(2.21):

$$\frac{1}{GPP} = \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha PAR} \quad (2.22)$$

Uma boa aproximação para a eq.(2.22) é:

$$Y = a + bX \quad (2.23)$$

onde:

$$Y = \frac{1}{GPP}$$

$$X = \frac{1}{PAR}$$

$$a = \frac{1}{\beta}$$

$$b = \frac{1}{\alpha}$$

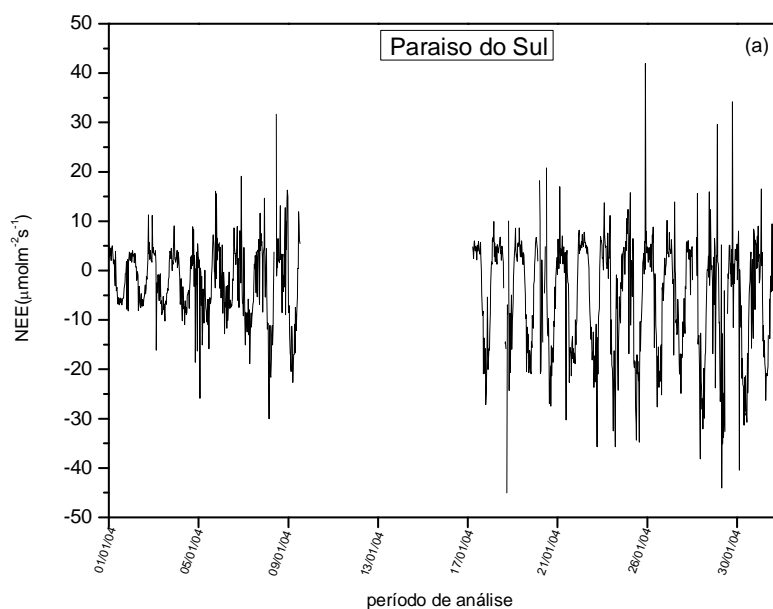
Assim, os coeficientes α e β podem ser escritos como:

$$\alpha = \frac{1}{b}$$

$$\beta = \frac{1}{a}$$

Fez-se um teste para validar as equações empíricas utilizadas no preenchimento das lacunas. Selecionou-se um conjunto de dados de 30 dias, para

cada um dos sítios experimentais de nosso estudo. Ambos os sítios, Paraíso do Sul e Cachoeira do Sul (descritos no próximo capítulo), durante o período de estudo, foram de cultura de arroz irrigado. O período analisado para Paraíso do Sul foi de 01 janeiro 2004 a 31 janeiro 2004 e para Cachoeira do Sul foi de 17 dezembro 2010 a 17 janeiro 2011. Criou-se uma lacuna no conjunto de dados para cada um dos sítios experimentais. Para o sítio de Paraíso do Sul, a lacuna criada foi de 8 dias (10 janeiro 2004 a 17 janeiro 2004 – figura 2.1a). Após, preencheu-se os dados faltantes, utilizando as equações empíricas e comparou-se com as medidas observacionais (figura 2.2a). Para o sítio de Cachoeira do Sul, criou-se também uma lacuna de 8 dias (24 dezembro 2010 a 31 dezembro 2010 – figura 2.1b). Preencheram-se os dados faltantes como descrito anteriormente, e verificou-se a validade deste processo com a análise das medidas observacionais (figura 2.2b). Durante o período noturno, o NEE modelado foi subestimado em ambos os sítios. Para o período diurno, o NEE modelado foi subestimado à medida que a planta cresce, para os dois sítios de estudo. Contudo, observou-se um preenchimento satisfatório, pois o coeficiente de correlação entre a série temporal do NEE modelado com o NEE observado, foi de 0,80 para o sítio de Paraíso do Sul e de 0,90 para o sítio de Cachoeira do Sul .



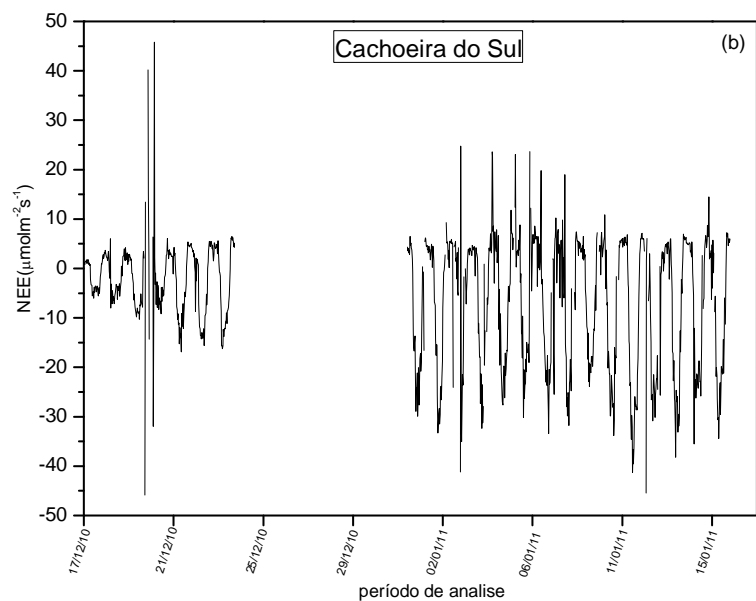
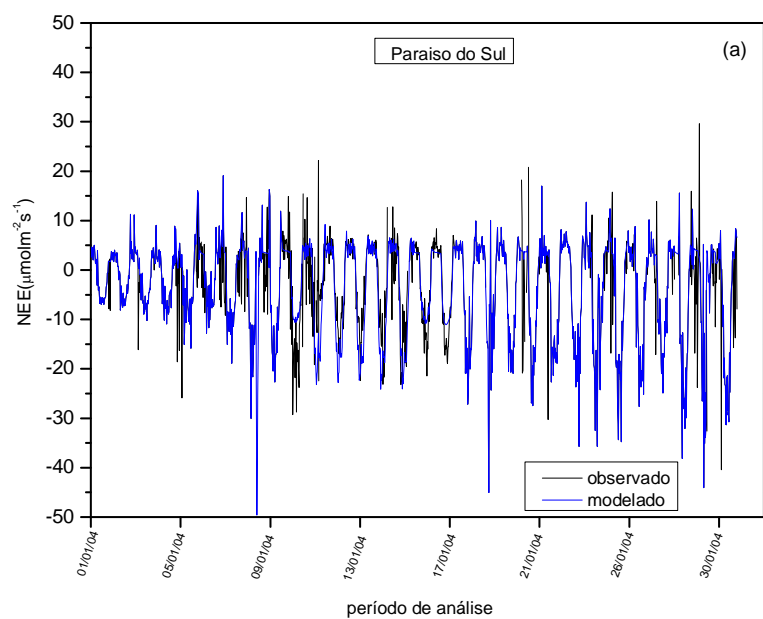


Figura 2.1 – Lacuna criada no conjunto de dados (30 dias), para cada sítio experimental de cultura de arroz, para validar as equações empíricas utilizadas neste preenchimento. Ambos os sítios experimentais com lacunas de 8 dias. (a) sítio de Paraíso do Sul com lacuna de 10 janeiro 2004 a 17 janeiro 2004 (b) sítio de Cachoeira do Sul com lacuna de 24 dezembro 2010 a 31 dezembro 2010.



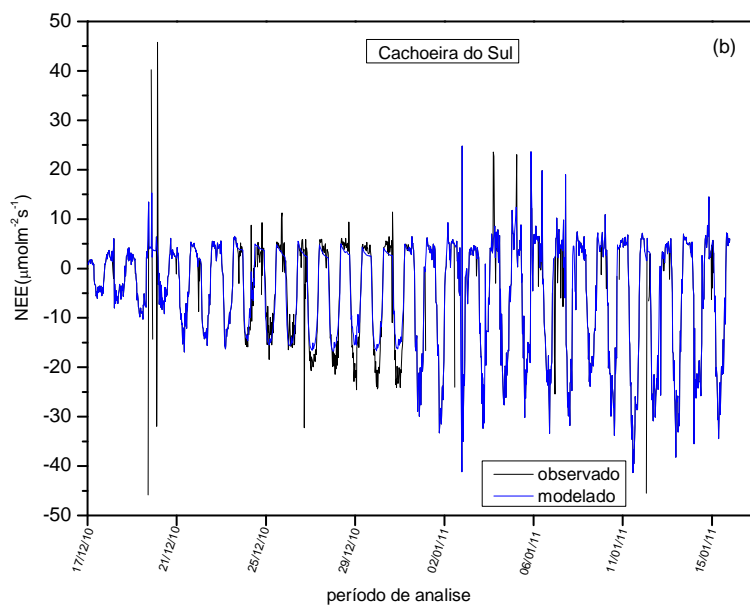


Figura 2.2 – Preenchimento das lacunas utilizando as equações empíricas para o conjunto de dados selecionados (30 dias) para cada sítio experimental de cultura de arroz. Linha em preto, os dados observados e linha em azul os dados modelados. (a) Preenchimento da lacuna para o sítio de Paraíso do Sul. (b) Preenchimento da lacuna para o sítio de Cachoeira do Sul.

Capítulo 3

3 Descrição dos Sítios Experimentais e Dados Utilizados

Neste capítulo apresenta-se a descrição dos sítios, Paraíso do Sul e Cachoeira do Sul, ambos localizados na região orizícola da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul, assim como os dados utilizados para estimar a troca líquida de CO₂ no ecossistema.

3.1 Sítio de Paraíso do Sul

3.1.1 Descrição do sítio

Este sítio experimental encontra-se em uma área de cultivo de arroz irrigado, localizado no município de Paraíso do Sul, na região central do Rio Grande do Sul (RS) (figura 3.1.1).

A lavoura de arroz, neste sítio experimental, compreende uma área de aproximadamente 1,25ha e tem como característica terreno plano e homogêneo. O solo é classificado como planossolo hidromórfico (EMBRAPA,1999). O cultivar utilizado nesta safra 2003-2004 foi o IRGA 417. Os solos apropriados para o cultivo do arroz irrigado, caracterizam-se pela topografia plana, pois assim facilitam a manutenção da lâmina de água sobre a superfície do solo e dificultam a lixiviação de nutrientes (Arroz Irrigado: recomendações técnicas,2005). O período de cultivo foi de novembro de 2003 a abril de 2004 (132 dias) e no restante do ano o solo permaneceu sem cultura. O campo foi alagado 30 dias após a semeadura e permaneceu com uma lâmina de água de 5-10cm de espessura durante todo o período de cultivo.

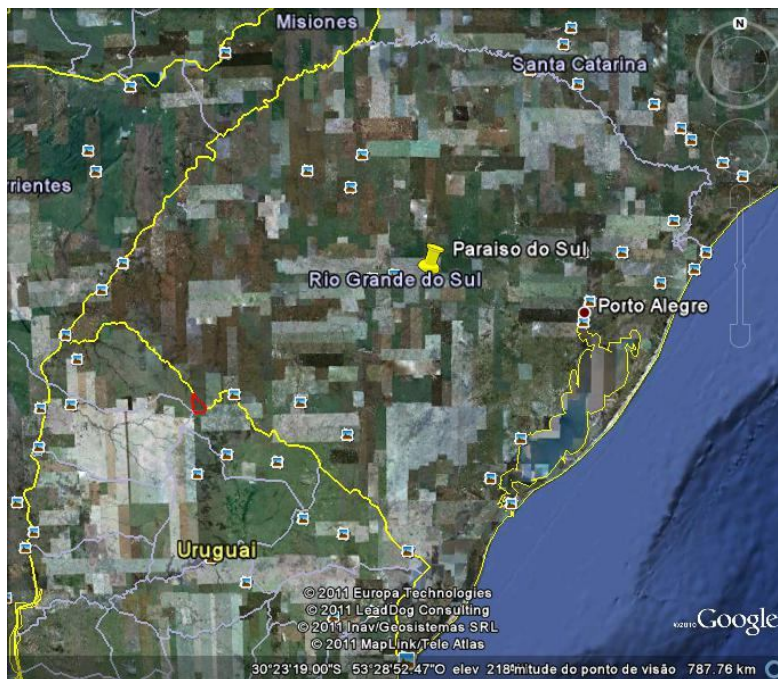


Figura 3.1.1 - Localização do sítio de Paraiso do Sul – RS.

O Laboratório de Micrometeorologia (Lumet) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) realizou observações experimentais neste sítio, entre os anos de 2003 e 2004. A torre micrometeorológica fez parte do projeto CT-HIDRO, que tinha como propósito, descrever condições de superfície para diferentes ecossistemas do país.

Os sensores foram fixados em uma torre micrometeorológica de 10 m de altura que se encontrava instalados nas coordenadas (29° 44' 39,6"S; 53° 8' 59,8"W) (figura 3.1.2). Medidas de alta frequência (16 Hz) das componentes da velocidade do vento e temperatura do ar foram feitas pelo anemômetro sônico tridimensional (CSAT-3D, Campbell Scientific, Inc., EUA) e medidas da concentração de CO₂ e umidade do ar pelo analisador de gás de caminho aberto (LI 7500, Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, EUA) (figura 3.1.3)

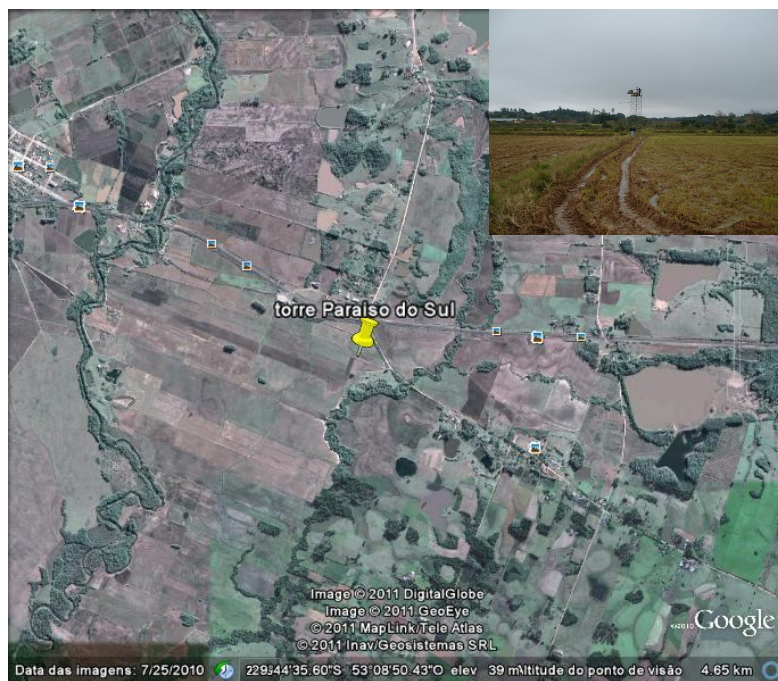


Figura 3.1.2 - Local da torre micrometeorológica instalada no sítio experimental em Paraíso do Sul – RS. Torre micrometeorológica – lado direito na parte superior.



Figura 3.1.3 - Sistema de covariância de vórtices (*eddy covariance*): anemômetro sônico e analisador de gás de caminho aberto – sítio de Paraíso do Sul.

Também se obteve, a cada 10 min, medidas de temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, pressão, precipitação com sensores a 10m de altura, medidas de radiação à 8m de altura e temperatura e umidade do solo. Os sensores utilizados para cada medida citada acima, estão descritos na tabela (3.1.1).

Tabela 3.1.1 – Medidas adicionais, sensores e altura dos sensores no sítio de Paraíso do Sul.

medida	sensor	altura do sensor
Temperatura e umidade do ar	HMP45C	10m
Velocidade e direção do vento	Young 8100	10m
Pressão	PTB101B	10m
Precipitação	Rain Gauge TB4	10m
Temperatura do solo	STP01" Soil Temperature Profile"	-2,-5,-10,-20 e -50cm
Umidade do solo	Delta T Device Profile Prob PR1	-10,-20,-30,-40,-60 e -100cm
Radiação de onda longa	Pirgeômetro CG1	8m
Radiação de onda curta	Piranômetro CM6B	8m
Radiação fotossinteticamente ativa(PAR)	Lite	8m

3.1.2 *Footprint* das medidas de fluxo

O *footprint* dos fluxos no campo de arroz, foi analisado para confirmar que as medidas desses fluxos são representativas para o estudo que estamos focando. Utilizou-se o modelo que mede a contribuição cumulativa normalizada para as medidas de fluxo (CNF) a partir do vento acima do dossel (Schuepp et al., 1990), definida pela equação:

$$CNF(x_i) = e^{-\frac{U(Z-d)}{u_* K x_i}} \quad (3.1)$$

onde x_i é a distância da torre (m), U é a velocidade do vento na direção u (ms^{-1}), Z é a altura de medição (m), d é deslocamento do plano zero (m). De acordo com

Montheith (1975), para plantas com altura h entre 20 e 200cm, pode-se estimar d pela equação $\ln d = 0,979 \ln h - 0,154$, porém na prática pode-se utilizar a aproximação $d \approx 0,63h$. K é a constante de Von Karman (0,4), u_* é a velocidade de fricção (ms^{-1}).

A figura 3.1.4 mostra que 80% dos fluxos turbulentos, a 10m de altura, vem em média de 800m. O sistema de covariância de vórtices foi colocado em uma área de 1,25ha de cultivo de arroz, sendo que em torno desta área também era campo de arroz. Assim, as medidas de fluxos são da própria cultura.

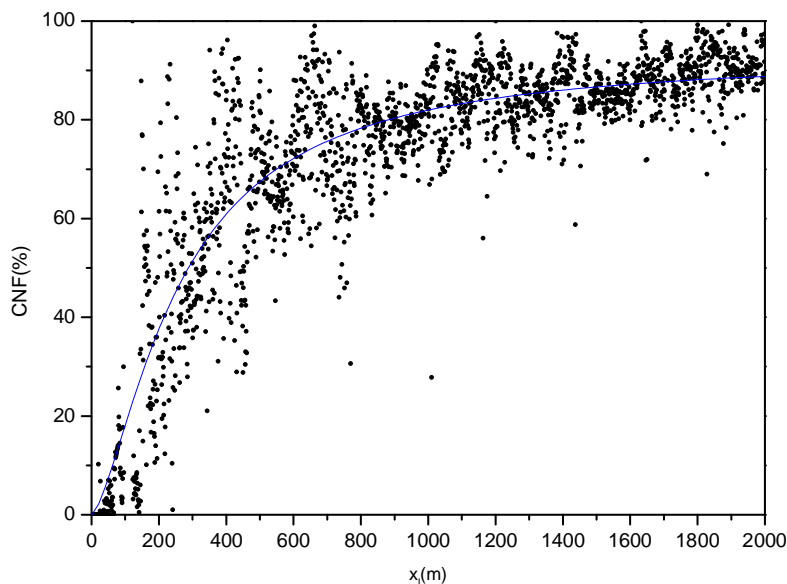


Figura 3.1.4 - Contribuição cumulativa normalizada (CNF) das medidas de fluxos para o período de cultivo do arroz (novembro de 2003 a abril de 2004) para o sítio de Paraíso do Sul.

3.1.3 Medidas de fluxos de CO_2

O método utilizado para o cálculo dos fluxos turbulentos de CO_2 foi o de covariância de vórtices (descrito no capítulo 2, seção 2.1.3), que utiliza observações em alta frequência, tanto da propriedade cujos fluxos se querem estimar, quanto da componente do vento na direção em que os fluxos ocorrem. Então, para se medir o fluxo turbulento de CO_2 ($\overline{w'c'}$), deve-se coletar um grande número de amostras da concentração de CO_2 e da componente w do vento.

Os dados coletados foram armazenados e processados seguindo o protocolo CEOP (*Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project* – www.ceop.net). Utilizando o método EC e com auxílio de linguagem computacional Fortran-77, foram feitas médias de 30min. O fluxograma desde a aquisição dos dados, processamento até o arquivamento, seguindo o protocolo CEOP, está na figura 3.1.5. Os dados arquivados (dados de saída) compõem arquivos distintos com diferentes variáveis. O arquivo SFC (*CEOP Surface Meteorological and Radiation Dataset Format Definition*) armazena dados de superfície e radiação. O arquivo FLX (*CEOP Flux Dataset Format Definition*) armazena dados de fluxos e o arquivo STM (*CEOP Soil Temperature and Soil Moisture Dataset Format Definition*) armazena dados de temperatura e umidade do solo (exemplo dos dados de saída no Anexo A).

Foram analisados 385 dias de coleta de dados, de jul2003 a jul2004. Durante este período obteve-se falhas na aquisição dos dados. Isso pode ter ocorrido devido a problemas nos sensores, falta de energia ou até mesmo no armazenamento dos dados. Falhas nos dados são inevitáveis quando registros de dados são contínuos para um longo período e para dados de fluxos medidos pelo método de EC. Aplicou-se a correção de Webb nos fluxos turbulentos de CO₂.

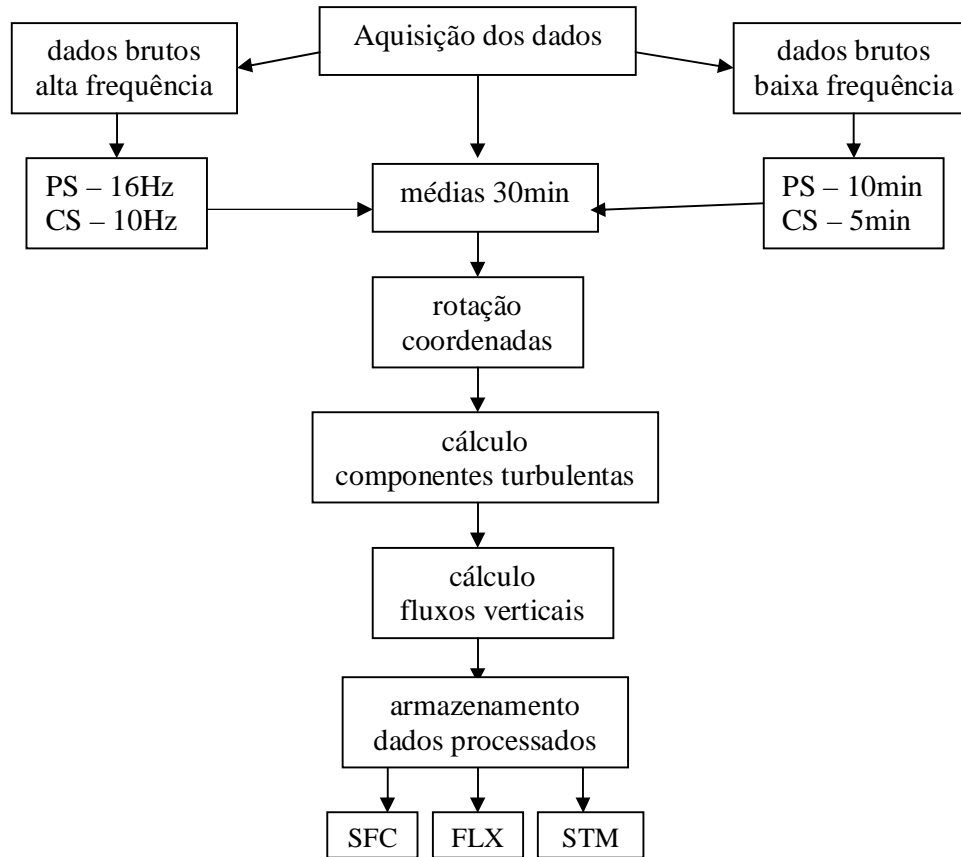


Figura 3.1.5 - Fluxograma de aquisição de dados, processamento e arquivamento para ambos os sítios experimentais (Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS)). O arquivo SFC armazena dados de superfície e radiação, FLX armazena dados de fluxos e STM armazena dados de temperatura e umidade do solo.

3.1.4 Filtros utilizados nas medidas de fluxos de CO₂

Durante períodos noturnos em que as flutuações da velocidade vertical do vento são muito pequenas pode ocorrer a subestimação dos fluxos (Goulden et al., 1996). Com base nisso, pesquisadores estudam o comportamento dos fluxos noturnos de CO₂, pois quando esses fluxos são subestimados pode ocorrer uma superestimação no acúmulo anual de carbono (Falge et al., 2001; Baldochi, 2003).

Na tentativa de corrigir fluxos de CO₂, optou-se em filtrar, tanto fluxos noturnos quanto diurnos, das seguintes maneiras. Primeiro, foram filtrados fluxos noturnos de CO₂ usando a análise de σ_w (desvio padrão da velocidade vertical do vento). A figura (3.1.6) mostra o comportamento dos fluxos noturnos de CO₂ em

relação a σ_w . Os fluxos de CO_2 à noite foram filtrados utilizando $\sigma_w < 0,15\text{m/s}$. Com isso descartou-se 30% dos dados noturnos dos fluxos de CO_2 . Acevedo et al. (2009), em estudo no sítio de Paraíso do Sul, mostraram que o uso de σ_w na filtragem de dados pode melhor representar a taxa de respiração, pois numa série de tempo específica (por exemplo, 30min), σ_w apresenta menor variabilidade que u_* . Pattey et al. (2002) julgaram que σ_w é um parâmetro mais robusto que u_* analisando dados de fluxos noturnos de CO_2 em culturas agrícolas. Em segundo, considerou-se dados inadequados de fluxos de CO_2 , aqueles em que ocorreram eventos de precipitação, o que causa o mau desempenho do analisador de gás de caminho aberto, e também os por falta de energia, resultando em lacunas que serão descritas posteriormente. Foram, então, desconsiderados, aproximadamente, 10% dos dados.

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de 10Wm^{-2} foi utilizada para diferenciar o dia e a noite (figura 3.1.7). Isso resultou em 52% de todos os dados que estão sendo classificados como dados diurnos.

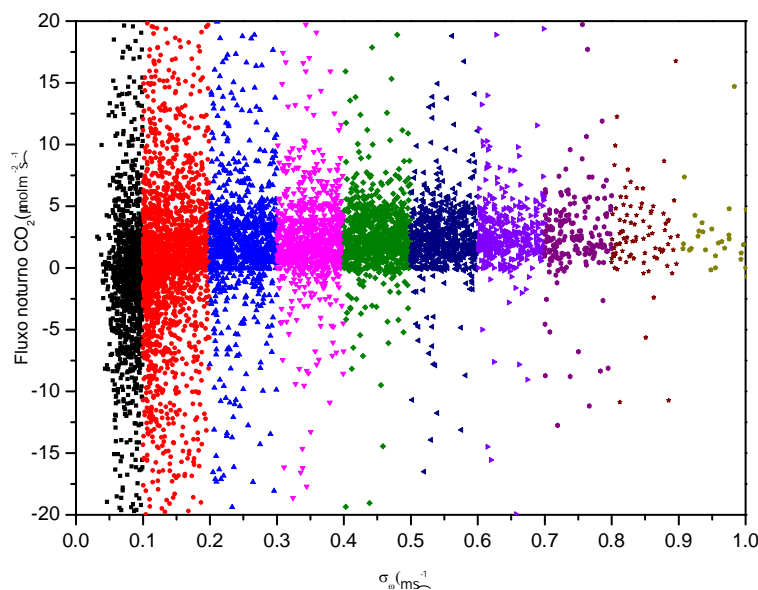


Figura 3.1.6 - Relação entre as médias de 30min do fluxo noturno de CO_2 e de σ_w para os 385 dias de coleta de dados no sítio de Paraíso do Sul. As cores indicam os intervalos definidos de σ_w a cada $0,1\text{ms}^{-1}$ com o correspondente fluxo de CO_2 .

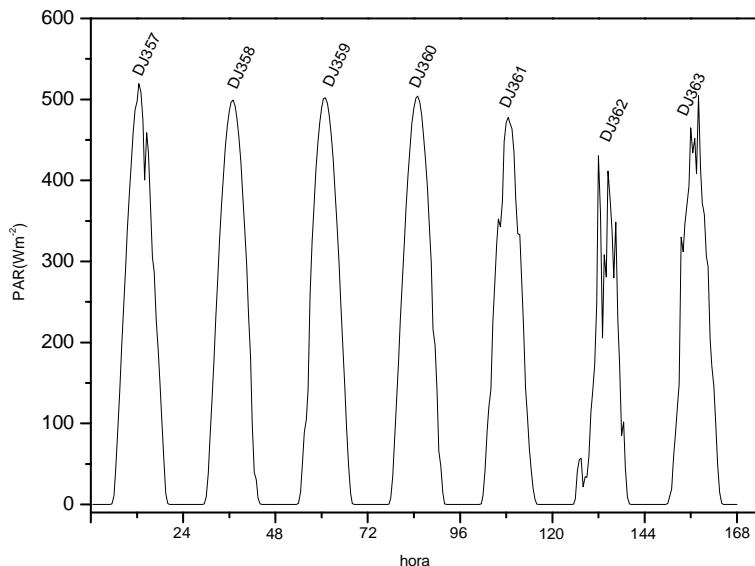


Figura 3.1.7 - Classificação do período diurno e noturno a partir da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), demonstrados em 7 dias de análise (dezembro de 2003).

3.1.5 Preenchimento dos dados de fluxos de CO₂

Os dados coletados foram processados e arquivados, depois de aplicadas as correções, resultando em alguns arquivos com lacunas. As lacunas, para o sítio de Paraíso do Sul, foram preenchidas conforme descrito no capítulo 2, seção 2.4. Utilizando linguagem computacional Octave, preencheu-se as lacunas como mostra a ilustração abaixo (figura 3.1.8).

Para este sítio, o conjunto de dados analisado, apresentou dois períodos com lacunas maiores que 4 dias: treze dias (24 setembro 2003 a 07 outubro 2003) e nove dias (30 novembro 2003 a 09 dezembro 2003). Para o preenchimento dessas duas lacunas, utilizou-se as equações empíricas descritas no capítulo 2. Foram utilizados dados de temperatura do ar (Tar) e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) do conjunto de dados que foram coletos a uma taxa de amostragem de 10min, pois esse conjunto estava completo para o período da análise.

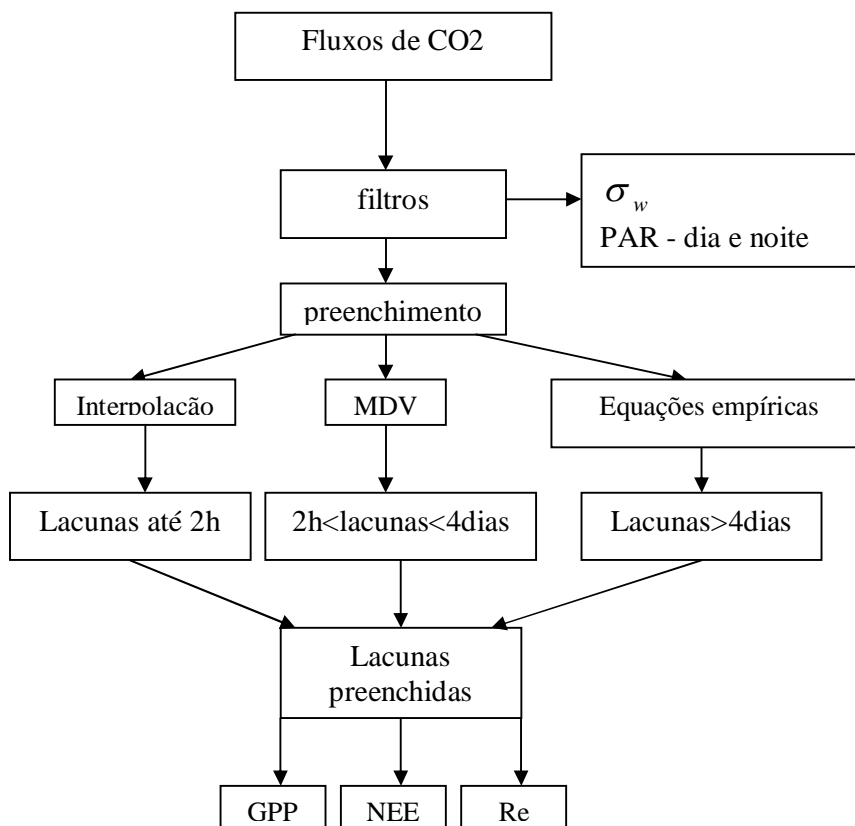


Figura 3.1.8 - Fluxograma do preenchimento de dados para os sítios experimentais (Paraíso do Sul e Cachoeira do Sul).

3.1.6 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) tem sido utilizado para caracterizar culturas do ponto de vista da interceptação e penetração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), e varia ao longo da evolução do ciclo da cultura, em consequência das atividades fotossintéticas e metabólicas da planta. Segundo Leong (1980), a eficiência fotossintética depende da taxa fotossintética por unidade de área foliar e da interceptação da radiação solar.

A área foliar de uma planta depende do número e do tamanho das folhas e, por consequência, do estágio de desenvolvimento da planta. O IAF pode ser denominado pela relação entre a área foliar e a área da superfície ocupada pela cultura (m^2m^{-2}), sendo um parâmetro importante para estudos de estrutura da

vegetação. O IAF tem forte relação com a produtividade primária e com a biomassa da vegetação.

Durante o desenvolvimento da cultura, a variação temporal da área foliar em geral aumenta até um limite máximo, no qual permanece por algum tempo, em seguida decresce devido à maturação das folhas. Como a fotossíntese depende da área foliar, o rendimento da cultura será tanto maior quanto mais rápido a planta atingir o índice de área foliar máximo e quanto mais tempo a área foliar permanecer ativa (PEREIRA;MACHADO, 1987).

Para este sítio experimental, o índice de área foliar (IAF) foi obtido do MODIS Collection 5 Leaf Area Index (MOD15A2) desde o início da semeadura. O IAF foi feito a cada 8 dias em 1km de resolução sobre uma grade de integração senoidal de 10 graus.

3.2 Sítio de Cachoeira do Sul

3.2.1 Descrição do sítio

Este sítio experimental encontra-se localizado na região central do Rio Grande do Sul, no município de Cachoeira do Sul (figura 3.2.1). A área abrangente desse estudo é uma propriedade agrícola privada de aproximadamente 400ha de cultivo de arroz irrigado e tem como característica terreno plano e homogêneo. O solo é classificado como planossolo háplico eutrófico (EMBRAPA,1999). A área com arroz foi cultivada com a cultivar de arroz irrigado Puitá, no ano de 2010-2011 e no ano 2011-2012, com a cultivar Epagri. O período de cultivo do arroz, para ambos os anos (2010-2011 e 2011-2012) foi de outubro a março. Para o ano de 2010-2011 foram 148 dias de cultivo e para o ano de 2011-2012, foram 164 dias.

No período entre uma safra e outra, a lavoura de arroz permaneceu sem cultura, com vegetação que cresceu espontaneamente. Nos dois anos agrícolas, o solo foi alagado 30 dias após a semeadura do arroz e permaneceu com uma lâmina de água em torno de 10cm de espessura durante toda a estação de crescimento da cultura.



Figura 3.2.1 - Localização do sítio de Cachoeira do Sul – RS.

O grupo de pesquisas LUMET (UFSM) desenvolve observações experimentais, nesta área, desde outubro de 2009. Nesta área, foi instalada uma torre micrometeorológica de 6m de altura, nas coordenadas ($30^{\circ}27'71''S$; $53^{\circ}14'79''W$), para coleta de dados meteorológicos, radiação e medidas de fluxo, como um dos sítios experimentais da rede SULFLUX (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudança Climática (www.ufsm.br/sulflux) (figura 3.2.2)

Medidas de alta frequência (10 Hz) das componentes da velocidade do vento e temperatura do ar (3m de altura) foram realizadas pelo anemômetro sônico CSAT-3D e medidas da concentração de CO_2 e umidade do ar (3m de altura) pelo analisador de gás de caminho aberto LI-7500 (figura 3.2.3).

Dados observacionais de pressão, precipitação e temperatura do solo foram coletados a cada 5 min. Também se obteve medidas de radiação e fluxo de calor no solo. Estimou-se o índice de área foliar (IAF), durante o período de cultivo do arroz, para os dois anos consecutivos. Os sensores utilizados, neste sítio, estão descritos na tabela (3.2.1).

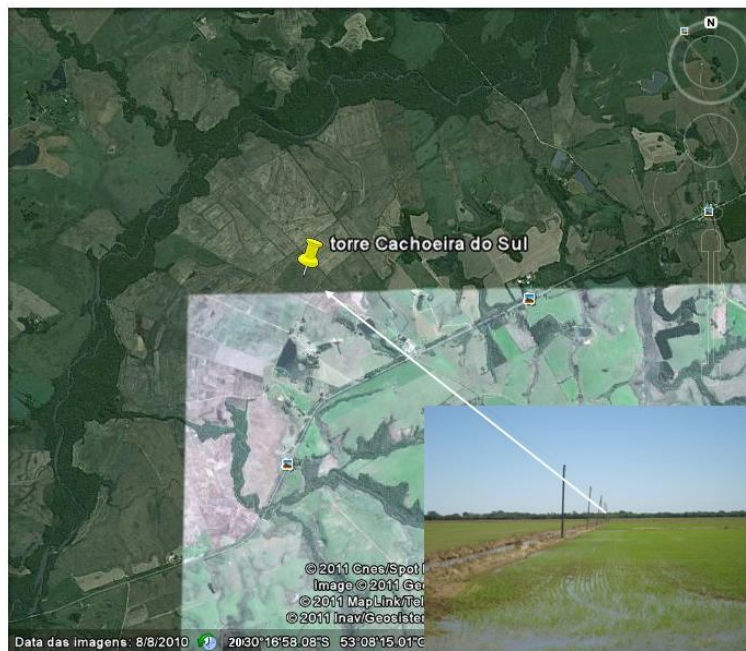


Figura 3.2.2 - Local da torre micrometeorológica instalada no sítio experimental em Cachoeira do Sul – RS. Torre micrometeorológica – lado direito na parte inferior.



Figura 3.2.3 - Sistema de covariância de vórtices (*eddy covariance*): anemômetro sônico e analisador de gás de caminho aberto – sítio de Cachoeira do Sul.

Tabela 3.2.1 – Medidas adicionais, sensores e altura dos sensores no sítio de Cachoeira do Sul.

medida	sensor	altura do sensor
Pressão	PTB220A	1m
Precipitação	Rain Gauge TB4	6m
Temperatura do solo	Termopar tipo E – TCAV-L	-2cm
Fluxo de calor no solo	HFP01SC-L	-2cm
Radiação de onda curta	Piranômetro CM6B	6m
Radiação fotossinteticamente ativa(PAR)	PAR Lite	0,5m
Saldo de radiação	NR Lite	3,4m
Índice de área foliar (IAF)	LI-3000A “ <i>Portable Area Meter</i> ”	

3.2.2 *Footprint* das medidas de fluxo

A análise do footprint, neste sítio experimental, também foi usada para verificar se as medidas de fluxos eram representativas para este estudo. Utilizou-se a equação (3.1), descrita no subitem 3.1.2, para esta análise.

Os resultados (figura 3.2.4) mostram que 85% dos fluxos turbulentos a 3m de altura, vêm em média de 300m. O sistema de EC foi instalado em uma área de 100mx100m de arroz irrigado e cercado por arroz da mesma variedade. Assim, as medidas de fluxo são da própria cultura.

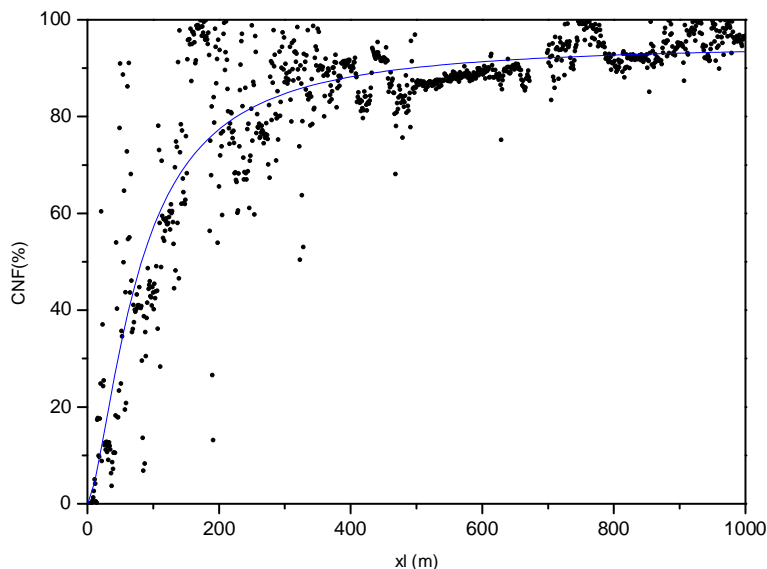


Figura 3.2.4 - Contribuição cumulativa normalizada das medidas de fluxos para o período de cultivo do arroz (outubro de 2010 a março de 2011) para o sítio de Cachoeira do Sul.

3.2.3 Medidas de fluxos de CO_2

Os fluxos turbulentos de CO_2 no sítio de Cachoeira do Sul, foram calculados pelo método de EC (descrito no capítulo 2, seção 2.1.3). Para o cálculo do NEE foi desconsiderado o armazenamento (ver seção 2.3). Foram feitas médias de 30min dos fluxos turbulentos armazenando-os conforme protocolo do CEOP (www.ceop.net). Para o conjunto de dados deste sítio, analisou-se, aproximadamente, 683 dias de coleta de dados, de junho de 2010 a março de 2012. Neste período, se obteve falhas no conjunto de dados. Aplicou-se a correção de Webb para o fluxo de CO_2 .

3.2.4 Filtros utilizados

Assim como para o sítio de Paraíso do Sul, os fluxos de CO_2 também foram filtrados para o sítio de Cachoeira do Sul. Primeiramente, filtrou-se fluxos noturnos de CO_2 usando a análise de σ_w (figura 3.2.5). Os fluxos de CO_2 noturno foram

filtrados utilizando $\sigma_w < 0,10 \text{ m/s}$. Com este filtro foram descartados 12% dos fluxos noturnos para o ano de 2010-2011 e 6% para o ano de 2011-2012. Após, foram descartados fluxos de CO_2 devido a eventos de precipitação ou a problemas imprevisíveis como o fornecimento de energia, resultando em 25% dos dados desconsiderados para o ano de 2010-2011 e 38% para o ano de 2011-2012.

A radiação PAR de 10 Wm^{-2} foi utilizada para diferenciar o dia e a noite (figura 3.2.6).

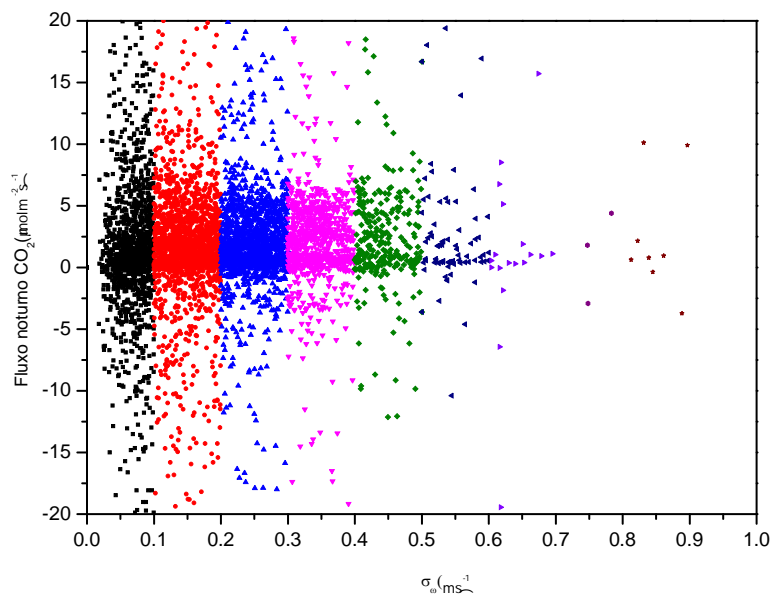


Figura 3.2.5 - Relação entre as médias de 30min do fluxo noturno de CO_2 e de σ_w para o sítio de Cachoeira do Sul. Análise de dois anos consecutivos de coleta de dados (2010 a 2012). . As cores indicam os intervalos definidos de σ_w a cada $0,1 \text{ ms}^{-1}$ com o correspondente fluxo de CO_2 .

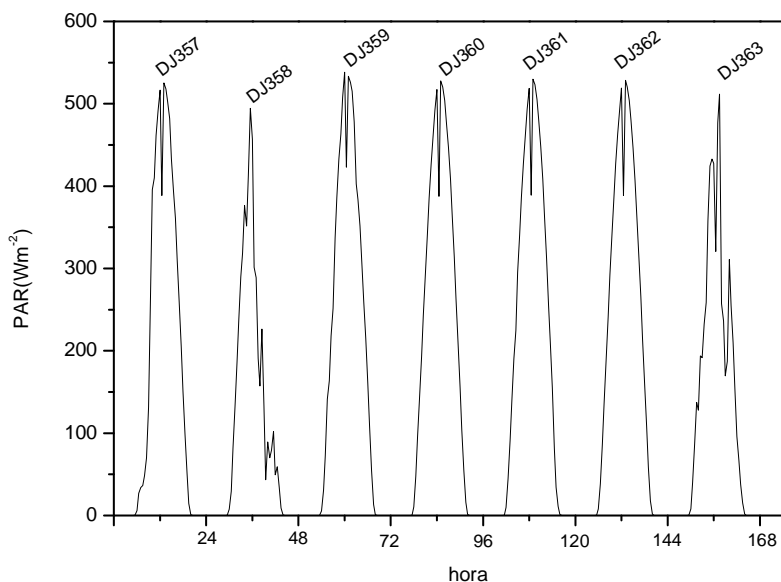


Figura 3.2.6 - Classificação do período diurno e noturno a partir da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), demonstrados em 7 dias de análise (dezembro de 2010).

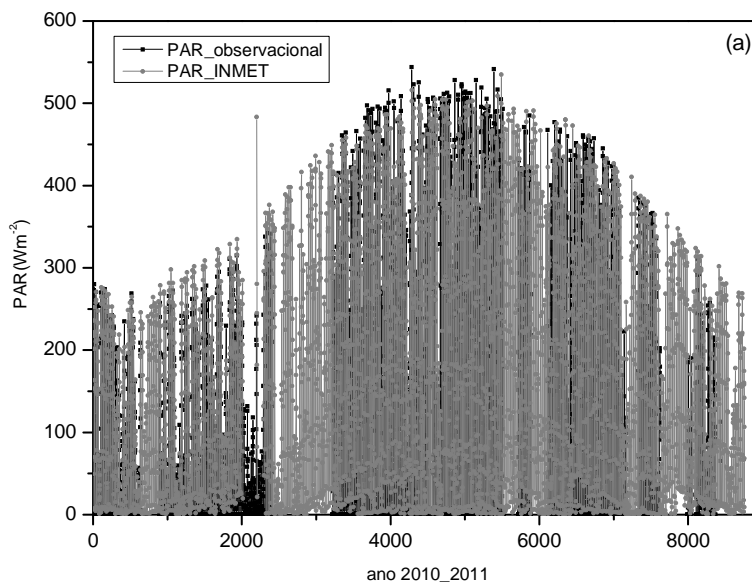
3.2.5 Preenchimento das lacunas

Para o sítio de Cachoeira do Sul, as lacunas foram preenchidas conforme teoria descrita no capítulo 2, seção 2.4.

O conjunto de dados analisados (total de 683 dias) apresentou alguns períodos com lacunas maiores que 4 dias que foram preenchidas com as equações empíricas descritas no capítulo 2. No conjunto de dados do ano de 2010-2011, ocorreram as seguintes lacunas: 10 dias (28 junho 2010 a 07 julho 2010), 34 dias (09 setembro 2010 a 12 outubro 2010), 8 dias (18 janeiro 2011 a 25 janeiro 2011) e 16 dias (15 abril 2011 a 30 abril 2011). No conjunto de dados do ano de 2011-2012, se obteve as seguintes lacunas: 21 dias (01 junho 2011 a 21 junho 2011), 9 dias (17 julho 2011 a 25 julho 2011), 7 dias (26 outubro 2011 a 02 novembro 2011), 13 dias (01 dezembro 2011 a 13 dezembro 2011), 22 dias (04 janeiro 2012 a 25 janeiro 2012) e 9 dias (01 fevereiro 2012 a 09 fevereiro 2012). As lacunas obtidas no ano 2010-2011, foram todas preenchidas com as equações empíricas para estimar a R_e e a GPP assim como o NEE. No ano 2011-2012, em que ocorreu uma quantidade maior de lacunas, optou-se, para alguns períodos sem dados, por preencher

utilizando os parâmetros (E_o , R_b , a , b) do ano anterior para o correspondente período. Observando-se a fase de desenvolvimento do arroz de modo a definir o mesmo período de utilização desses parâmetros (Anexo B – tabela1).

Foram utilizados dados de Tar e PAR da estação automática de Caçapava do Sul (INMET – Instituto Nacional de Meteorologia) quando não se tinha os dados observacionais da torre micrometeorológica. A estação de Caçapava do Sul foi escolhida por ser a estação mais próxima do sítio, pois não há estação do INMET em Cachoeira do Sul. Assim obteve-se um conjunto completo de medidas de Tar e PAR para todo o período de análise. Antes de utilizar os dados de Tar e PAR, ajustou-se esses dados aos requisitos pré-definidos para o cálculo do preenchimento. Utilizou-se uma relação entre a radiação global (R_g) e a PAR para os dados do INMET (Meek et al., 1984): $PAR = 0,45R_g$. Nas medidas de PAR do INMET, foi acrescido um fator de multiplicação de $1,1 \text{ Wm}^{-2}$ para aproximar os valores máximos aos valores dos dados observacionais (Figura 3.2.7). Para as medidas de Tar do INMET, foram acrescidos 2°C a cada valor, na tentativa de aproximar esses valores às medidas observacionais, sendo que apenas utilizamos esses dados quando não tínhamos os observacionais. (Figura 3.2.8).



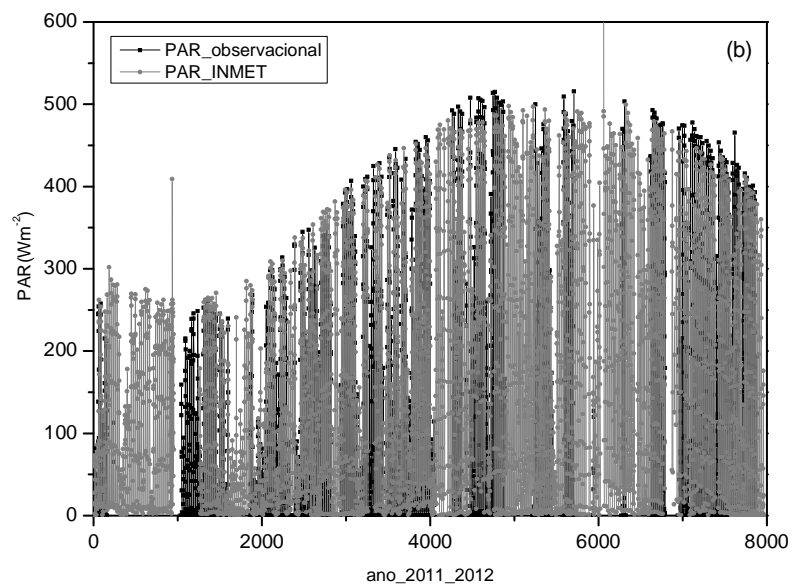
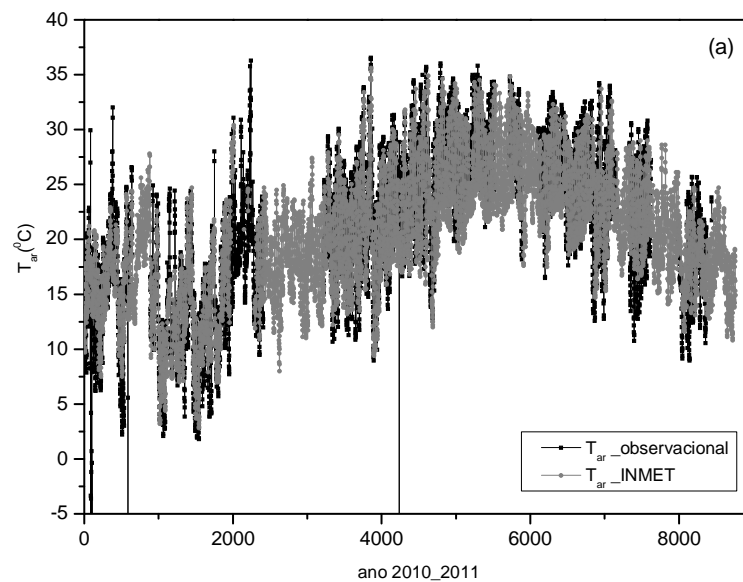


Figura 3.2.7 - Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) para o sítio de Cachoeira do Sul. (a) medidas no ano 2010-2011 e (b) medidas no ano de 2011-2012.



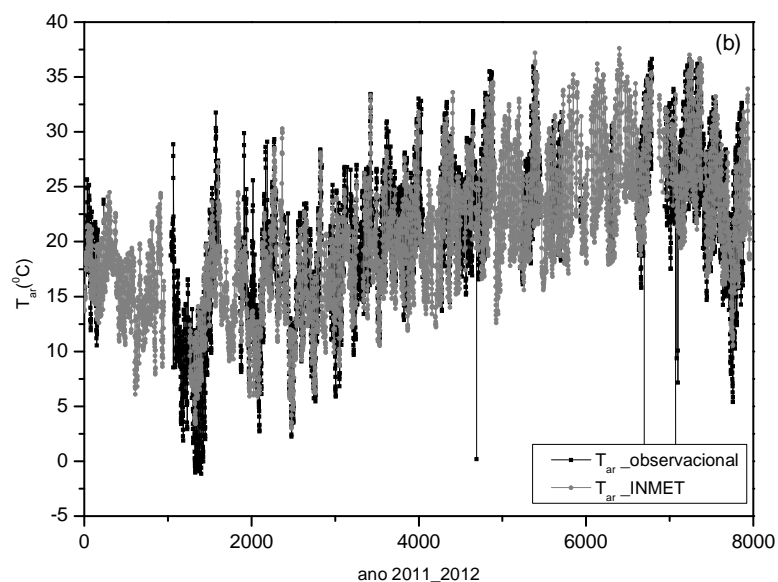


Figura 3.2.8 - Temperatura do ar para o sítio de Cachoeira do Sul. (a) medidas de Tar no ano 2010-2011 e (b) medidas no ano de 2011-2012.

3.2.6 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) foi estimado a partir de amostras destrutivas de cinco plantas de arroz, escolhidas aleatoriamente. A cada coleta de dados realizada no sítio experimental de Cachoeira do Sul, avaliou-se as medidas do IAF, sendo assim não ocorreram intervalos definidos para a realização dessas medidas. Essas medidas foram realizadas durante o período de cultivo do arroz para ambos os anos de análise. Avaliou-se também a altura máxima que a planta atingiu em cada safra.

Capítulo 4

4 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados e algumas discussões para ambos os sítios experimentais, Paraíso do Sul e Cachoeira do Sul.

4.1 Paraíso do Sul

4.1.1 Condições ambientais

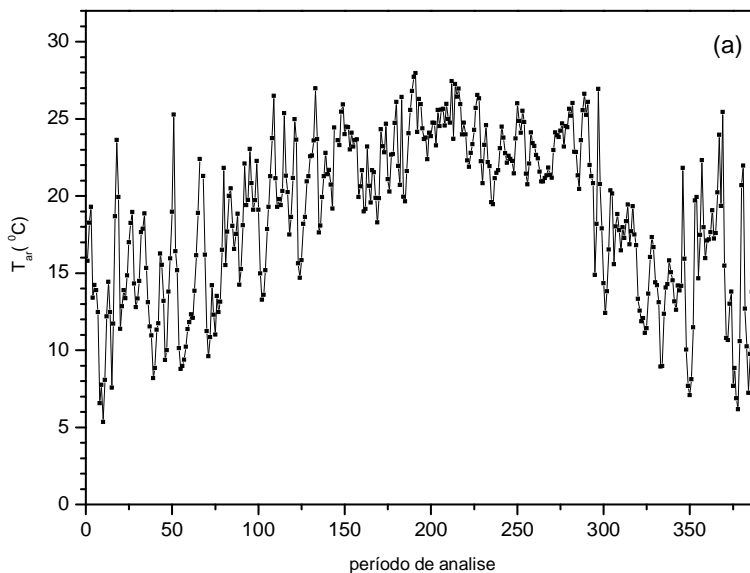
As variáveis meteorológicas do sítio de Paraíso do Sul para o período de julho de 2003 a julho de 2004 estão na figura (4.1.1). A temperatura do ar (figura 4.1.1a) teve valores máximos em janeiro e início de fevereiro, em torno de 27^oC, enquanto que os valores mínimos foram em julho (6^oC - valores não mostrados). Durante o período de cultivo do arroz (25 novembro 2003 a 04 abril 2004) a temperatura média do ar foi de aproximadamente 23^oC. Os maiores valores médios diários de radiação PAR (figura 4.1.1b) foram em dezembro e nos primeiros 10 dias de janeiro, com aproximadamente 170 Wm⁻². No período de cultivo a média diária de radiação PAR foi de 124 Wm⁻².

A figura (4.1.2) contém os valores médios mensais, para o sítio de Paraíso do Sul e a normal climatológica para a estação do INMET de Santa Maria. A temperatura média do ar apresentou valor máximo em janeiro de 2004, em torno de 25^oC. Durante o período de cultivo do arroz (dez2003 a mar2004) a temperatura média permaneceu entre 22 e 25^oC, e a normal climatológica nesses meses é entre 23 e 24,5^oC.

A precipitação (figura 4.1.3) foi inferior a 50 mm em 3 meses ao longo do ano. A precipitação total acumulada para os 385 dias foi de 1791 mm e para o período de cultivo do arroz foi de 477 mm. Em oito meses, a precipitação medida na torre micrometeorológica foi inferior a normal climatológica de Santa Maria e em cinco meses (julho de 2003 e de setembro de 2003 a dezembro de 2003) a precipitação foi superior a normal climatológica. Essas variáveis climatológicas influenciam no

cultivo do arroz, por esta razão a planta é cultivada, no RS, entre a primavera e o verão. Além disso, necessita de umidade, o que a leva a ser cultivada pelo método de irrigação.

A figura (4.1.4) mostra a intensidade da velocidade e direção do vento. O vento predominante nesta área, durante o período de estudo (julho de 2003 a julho de 2004), foi da direção leste-sudeste (ESE), em torno de 30%. Isto está representado a partir do comprimento de cada “braço” que aumenta de acordo com o aumento da frequência de ocorrência de ventos em determinada direção. Para o período de cultivo do arroz, os ventos mais frequentes provinham também de ESE (44%) (figura 4.1.5). A velocidade do vento mais frequente, tanto para o período de cultivo quanto para o período completo de estudo, foram de 2 a 4 ms^{-1} .



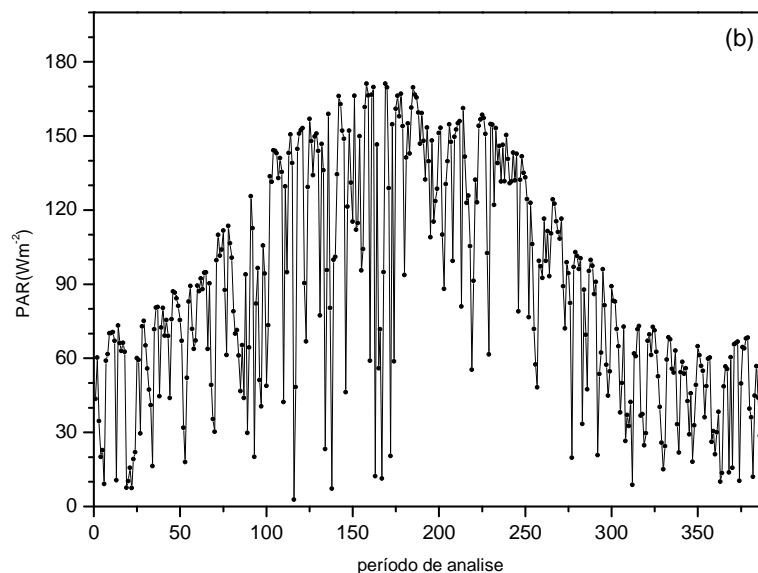


Figura 4.1.1 - Médias diárias das variáveis meteorológicas durante o período de estudo no sítio de Paraíso do Sul (julho de 2003 a julho de 2004). (a) temperatura do ar e (b) radiação fotossinteticamente ativa (PAR).

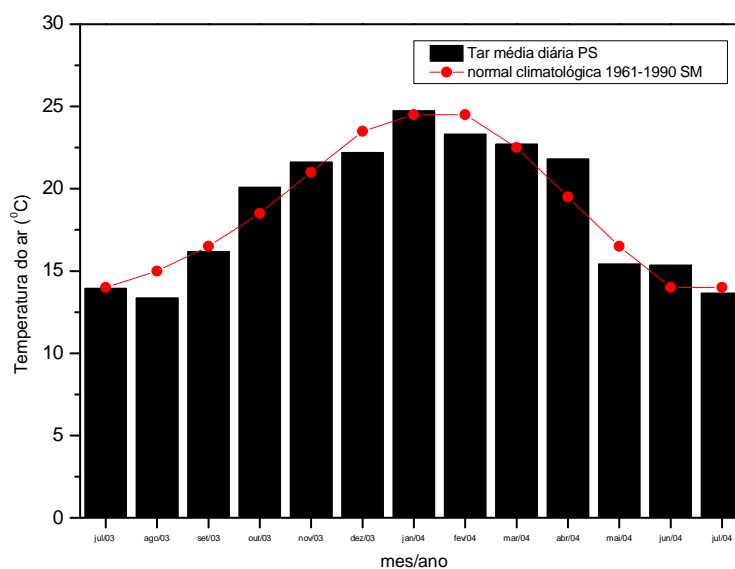


Figura 4.1.2 - Valores médios mensais da temperatura do ar para o período de estudo (julho de 2003 a julho de 2004). As barras em preto indicam a média mensal da temperatura do ar no sítio de Paraíso do Sul (PS) a partir dos dados observacionais. Os pontos em vermelho indicam a normal climatológica da temperatura do ar para a estação do INMET de Santa Maria (SM), período de 1961-1990.

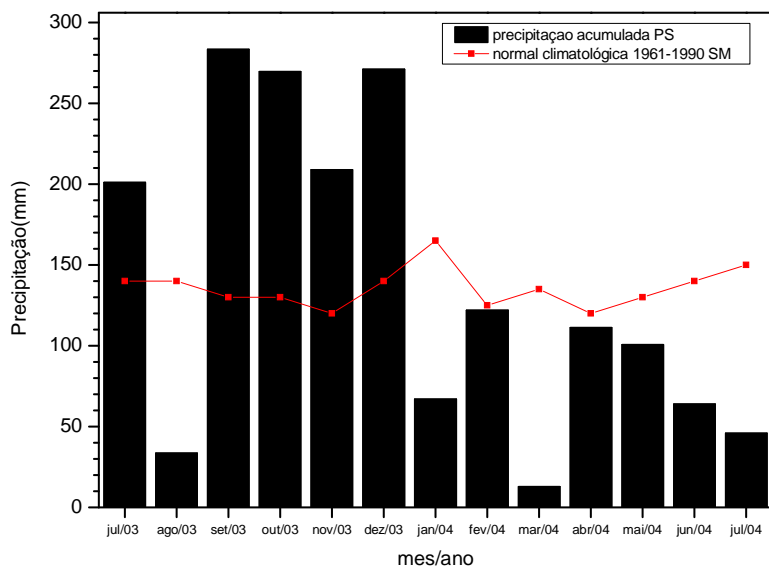


Figura 4.1.3 - Valores acumulados mensais de precipitação durante o período de estudo (julho de 2003 a julho de 2004). As barras em preto indicam a precipitação acumulada no sítio de Paraíso do Sul (PS) a partir dos dados observacionais. Os pontos em vermelho indicam a normal climatológica da precipitação para a estação do INMET de Santa Maria (SM) período de 1961-1990.

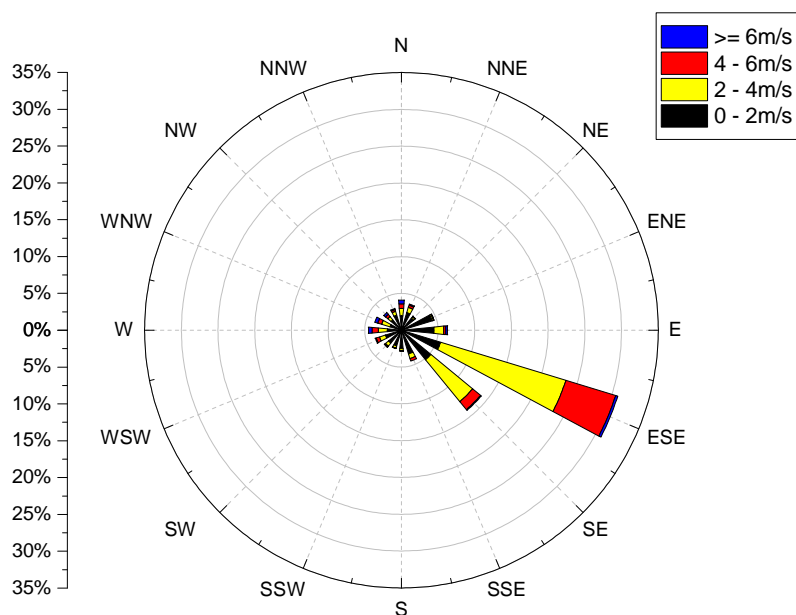


Figura 4.1.4 - Direção e velocidade média do vento durante o período de estudo (julho de 2003 a julho de 2004) para o sítio de Paraíso do Sul.

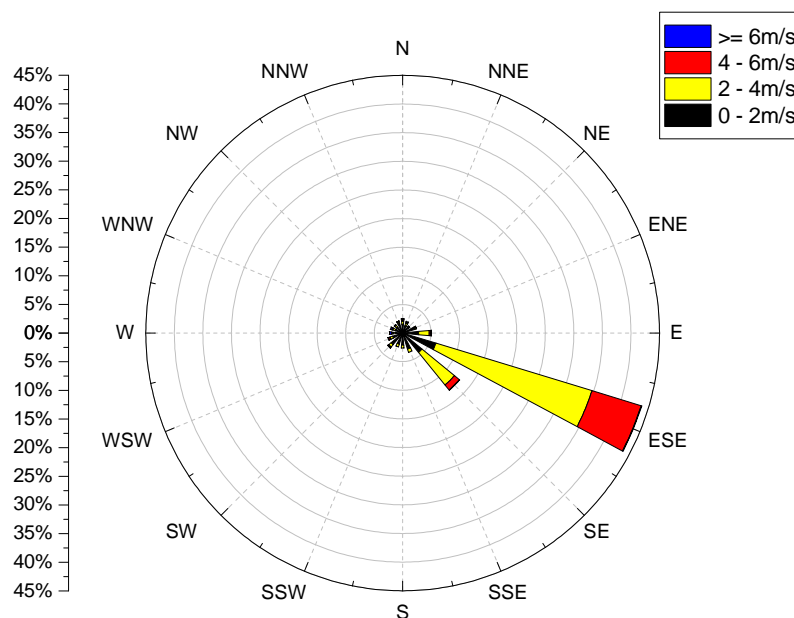


Figura 4.1.5 - Direção e velocidade média do vento durante o período de cultivo do arroz (novembro de 2003 a março de 2004) para o sítio de Paraíso do Sul.

4.1.2 Índice de área foliar (IAF)

O IAF para o sítio de Paraíso do Sul foi obtido do MODIS Collection 5 Leaf Área Index (MOD15A2). A figura (4.1.6) mostra o IAF para o período de cultivo de arroz (25nov2003 a 04abr2004). Verificou-se um aumento significativo 46 dias após o plantio e atingiu o máximo de $4,8\text{m}^2\text{m}^{-2}$ durante a fase vegetativa adulta (VJ) (fases descritas na seção seguinte). Ao final da fase reprodutiva (R), inicia-se a redução do IAF devido ao amadurecimento da planta.

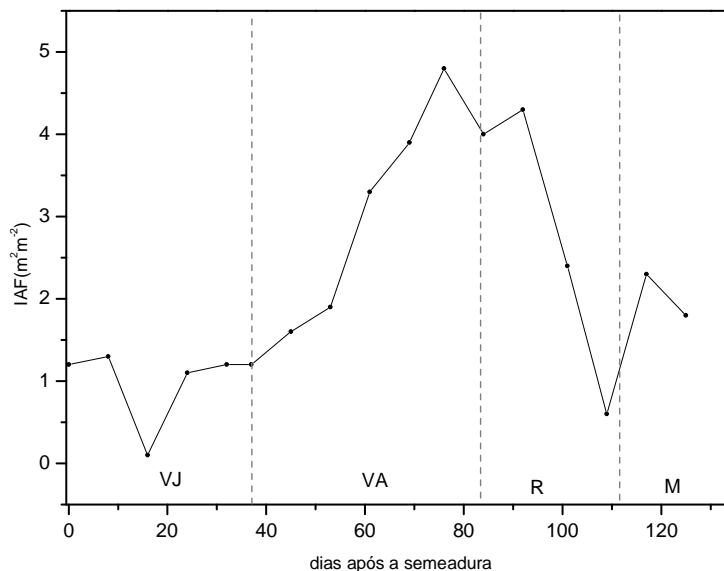


Figura 4.1.6 – Índice de área foliar (IAF) durante o período de cultivo do arroz no sítio de Paraíso do Sul. As linhas verticais tracejadas separam as fases de desenvolvimento do arroz: VJ=vegetativa jovem, VA=vegetativa adulta, R=reprodutiva e M=maturação.

4.1.3 Fluxos de dióxido de carbono

4.1.3.1 Ciclo médio diário de NEE

As médias diárias de NEE e PAR são mostrados na figura (4.1.7). O período de cultivo do arroz foi dividido em fases para melhor interpretar o crescimento da planta e a assimilação de CO_2 . Segundo Guimarães et al. (2002) o ciclo de desenvolvimento do arroz compreende três fases: vegetativa (V - 65 a 70 dias), reprodutiva (R - em média 35 dias) e a maturação (M - 30 a 40 dias).

Neste estudo, foi dividida a fase vegetativa em duas sub-fases: vegetativa jovem (VJ) e vegetativa adulta (VA). Com base no IAF, pois na VJ o IAF, de modo que na VJ o IAF permanece em torno de $1,2 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ enquanto que na VA chega a $4,8 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$. Também verificamos a absorção de CO_2 para melhor definir a divisão desta fase. A duração de cada fase do cultivo do arroz depende da região de cultivo, da fertilidade do solo e da época de semeadura. A época de semeadura do arroz é realizada no período em que oferece condições climáticas favoráveis para a cultura. De um modo geral, a melhor época de semeadura é aquela em que o período

reprodutivo das plantas de arroz coincide com a maior disponibilidade de radiação e temperatura, favorecendo desta forma a maior produção. No sul do Brasil, devido às baixas temperaturas entre os meses de maio e setembro, o cultivo normalmente ocorre fora deste período.

Todos os dados, após o preenchimento das lacunas, foram utilizados para calcular a média de cada fase de desenvolvimento da planta de arroz. O NEE foi positivo durante a noite e negativo durante o dia em todas as fases. O NEE na VJ (figura 4.1.7a) , 41 dias de cultivo, oscilou em torno de $-3 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. A absorção cresceu rapidamente na fase seguinte (VA). Na fase VA (figura 4.1 7b), que compreende 41 dias de cultivo, o NEE próximo ao meio-dia chegou a $-19,3 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. O máximo de absorção foi durante a fase R (figura 4.1.7c), 32 dias cultivo, com um pico de $-20.45 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ao meio-dia. Durante a fase M (figura 4.1.7d), 18 dias de cultivo, o NEE foi em média $-5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Resultados semelhantes foram encontrados por Alberto et al. (2009). Para o período noturno, o NEE foi em torno de $4,5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, para todas as fases da cultura. Tseng et al (2010) em estudo durante o período de maturação da planta de arroz, em Taiwan, encontraram NEE em torno de $2,76 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ para o período noturno e de $-7 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ durante o dia . Os maiores valores de PAR foram durante a VA e R, 414Wm^{-2} e 393Wm^{-2} , respectivamente. Por esta razão, o cultivo de arroz ocorre entre a primavera e o verão, pois a PAR é um dos principais fatores (além da temperatura e umidade) que determinam o crescimento e desenvolvimento da cultura. Os resultados indicam que durante as fases VA e R ocorreram os maiores valores de NEE durante o dia, como esperado, pois é nestas fases que ocorrem as maiores absorções de CO_2 da atmosfera.

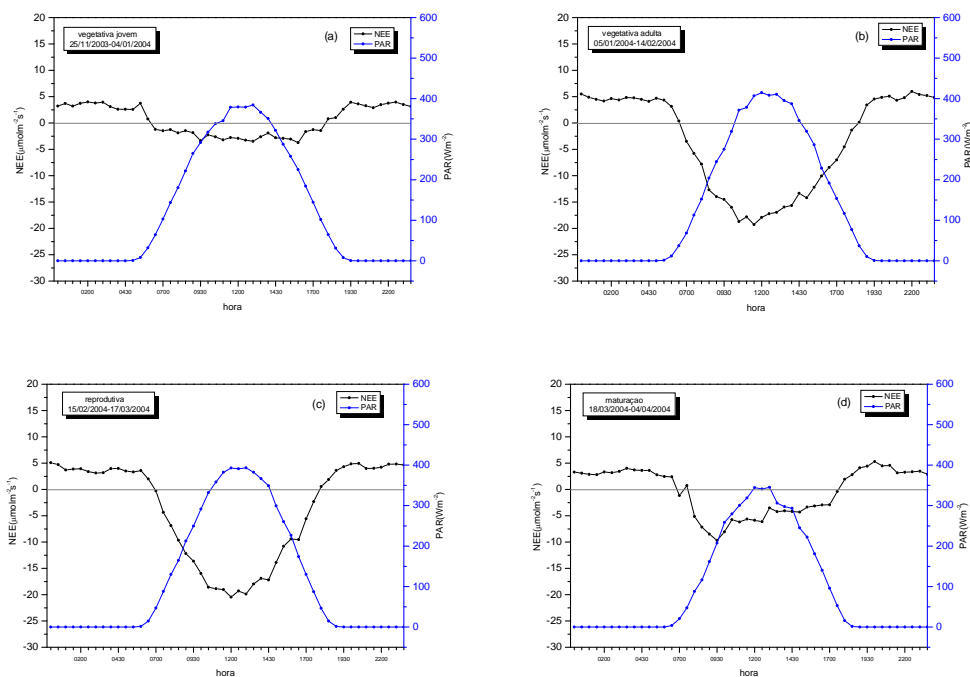


Figura 4.1.7 - Variações do ciclo médio diário dos intervalos de 30min de NEE e PAR para cada fase de desenvolvimento do arroz durante o período de cultivo para o sítio de Paraíso do Sul. (a) fase vegetativa jovem (VJ), (b) fase vegetativa adulta (VA), (c) fase reprodutiva, (d) fase de maturação.

4.1.3.2 Variações diárias de NEE, GPP e R_e

Os fluxos de C-CO₂ foram particionados em GPP e R_e . GPP foi calculada como sendo a diferença entre o NEE e a R_e ($GPP = NEE - R_e$). Para dados faltantes durante o período de análise (385 dias), utilizou-se o preenchimento descrito no subitem 2.4.

A evolução diária de NEE, GPP e R_e são mostradas na figura (4.1.8). Durante o início de P_1 (pousio1 - dias que antecedem o período de cultura, com solo não cultivado, coberto apenas com vegetação rasteira que cresce espontaneamente) que compreende 146 dias de análise, encontrou-se para GPP, valores em torno de $-2 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$. A R_e neste período (P_1) acompanhou inversamente a curva de evolução de GPP, com valores em torno de $2 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$. O NEE manteve-se, na maioria dos dias durante P_1 , com valores positivos chegando a atingir $4,08 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$. O período em que GPP atingiu valores muito pequenos

(quase zero) provavelmente tenha sido o período de preparo do solo (setembro-outubro), pois a R_e e NEE também decresceram nesse mesmo período.

Durante o período de cultivo do arroz (25 novembro 2003 a 04 abril 2004 - 132 dias) a GPP diária aumentou gradualmente chegando a um máximo de $-12,51 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ durante a fase vegetativa e depois mostrou uma redução até o final do cultivo (fase de maturação). Após 33 dias da colheita do arroz, a GPP aumentou novamente, provavelmente devido a vegetação espontânea que cresce nesta área. A R_e , no início do cultivo manteve-se em torno de $3 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, chegando a um máximo de $6,11 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ (43 dias após o plantio). Logo após, a R_e decresce até o final do cultivo. No início do cultivo (26 dias após o plantio) a lavoura de arroz age como uma fonte de C. O NEE diário tornou-se negativo em 22 de dezembro, e então aumenta gradualmente, quando atinge o máximo de absorção de $-7,69 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$. Logo após, o NEE decresce até o final do cultivo.

Após a colheita (P_2) o NEE retorna como fonte de C, a R_e e a GPP decrescem mantendo valores em torno de $-2 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, 33 dias após a colheita.

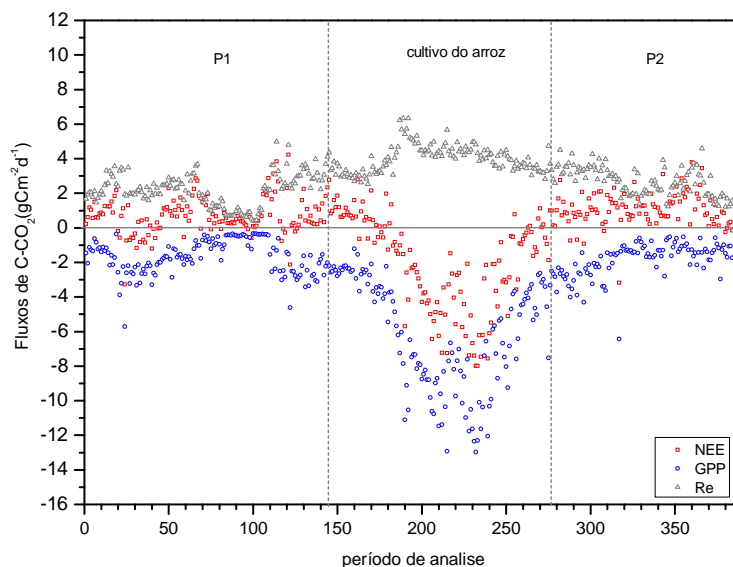


Figura 4.1.8 - Médias diárias de NEE, GPP e R_e para o período de estudo no sítio de Paraíso do Sul (03 julho 2003 a 22 julho 2004). Os quadrados (vermelho) representam o NEE, os círculos (azul) a GPP e os triângulos (cinza) a R_e . As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz (P1 e P2).

4.1.3.3 Acumulado de NEE, GPP e R_e para o período de cultivo

O total de carbono ($C-CO_2$) diário acumulado para o período de cultivo do arroz (132 dias), para o sítio de Paraíso do Sul, é apresentado na figura (4.1.9). O NEE acumulado, para este período, foi de $-270,53 gCm^{-2}$, indicando que a lavoura de arroz atuou como um “sumidouro” de C. A GPP e a R_e acumuladas durante o período de cultivo, foi de $-821,19 gCm^{-2}$ e $527,59 gCm^{-2}$, respectivamente. Na figura 4.1.10 tem-se o NEE total acumulado para, aproximadamente, 385 dias de análise. Durante P_1 (145 dias), a área onde foi cultivado o arroz, age como uma fonte de C ($107,18 gCm^{-2}$). No período de cultivo, o NEE acumulado para os 132 dias, foi de $-270,53 gCm^{-2}$. Após a colheita (P_2) o NEE foi de $115,76 gCm^{-2}$ (108 dias). Ao final do período de análise (385 dias), o cultivo de arroz irrigado neste sítio, atuou como um sumidouro de C ($-47,59 gCm^{-2}$). A figura (4.1.11) mostra os valores de NEE

acumulados em P_1 , no cultivo do arroz e em P_2 , demonstrando que os períodos sem arroz foram fontes de C, enquanto que no período de cultivo o campo agiu como um “sumidouro” de C.

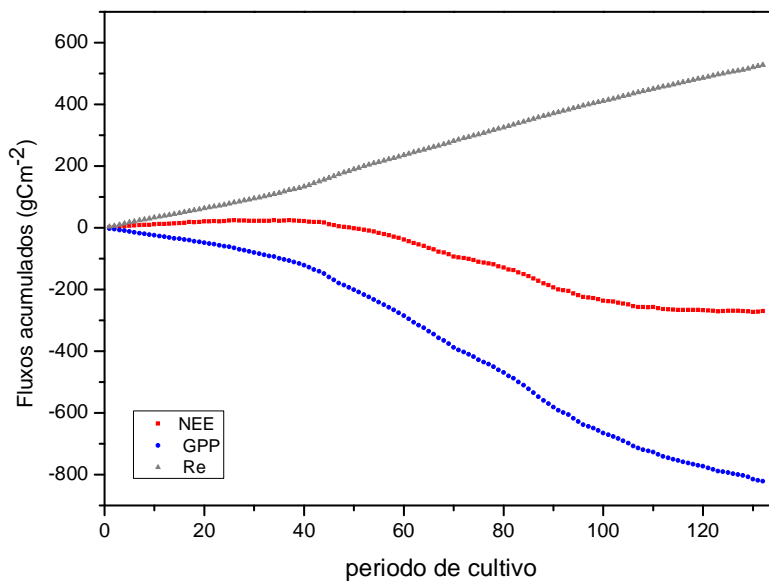


Figura 4.1.9 - Total de C acumulado durante o período de cultivo do arroz no sítio de Paraíso do Sul (25 novembro 2003 a 04 abril 2004). Os quadrados (vermelho) representam o NEE, os círculos (azul) a GPP e os triângulos (cinza) a R_e .

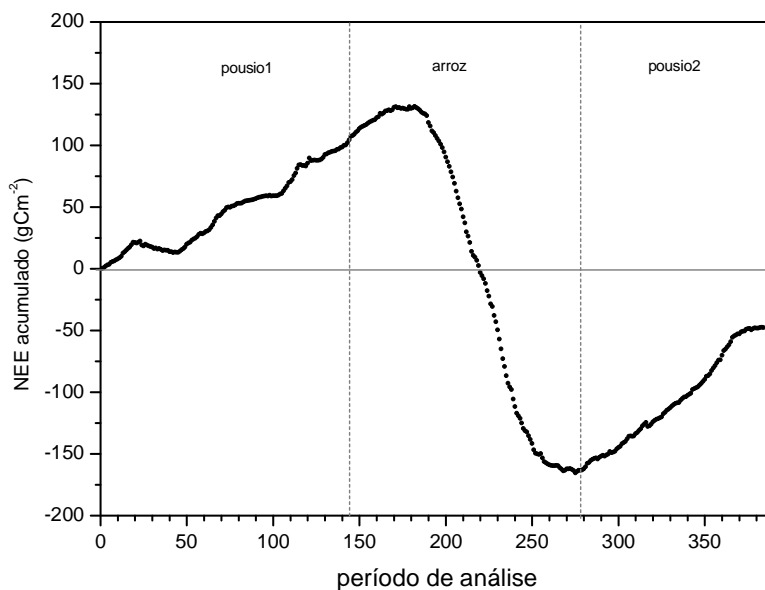


Figura 4.1.10 - NEE total acumulado durante o período de estudo no sítio de Paraíso do Sul (03 julho 2003 a 22 julho 2004). As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz.

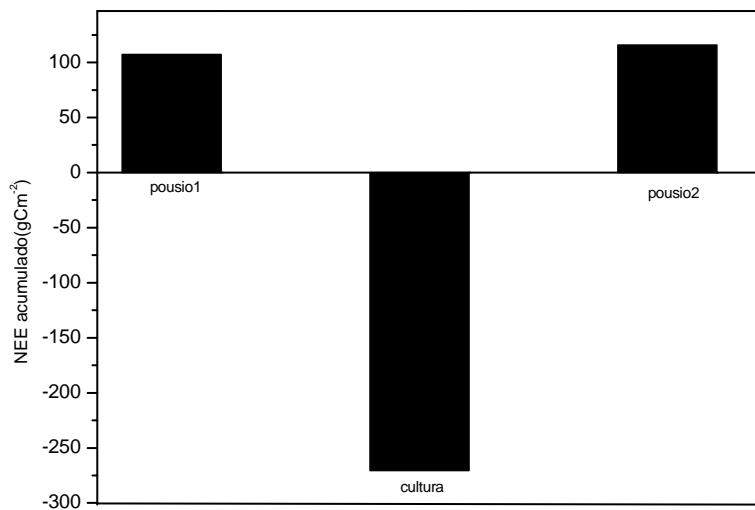


Figura 4.1.11 - NEE total acumulado para os períodos com e sem arroz no sítio de Paraíso do Sul (385 dias de análise).

4.2 Cachoeira do Sul

4.2.1 Condições ambientais

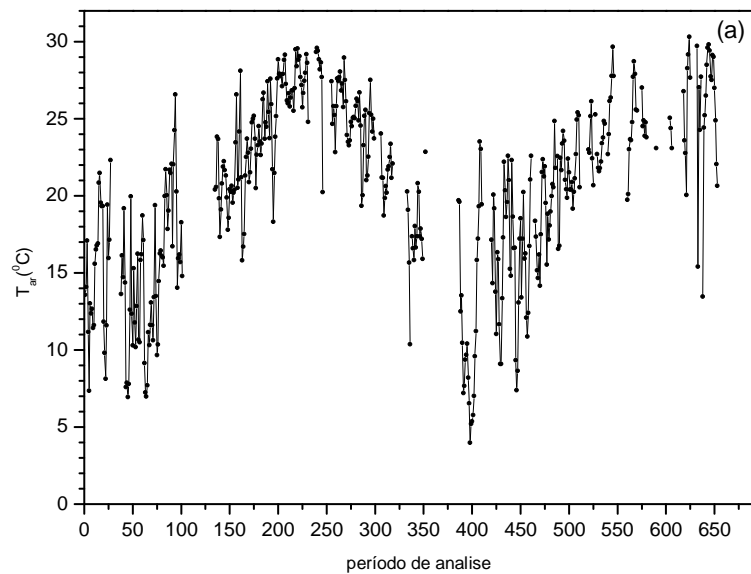
As variáveis meteorológicas do sítio de Cachoeira do Sul para o período de junho de 2010 a março de 2012 são mostradas na figura (4.2.1). Os dados observacionais para essas variáveis não foram preenchidos. Para os anos de 2010 e 2011, os maiores valores das temperaturas médias diárias ocorreram no mês de dezembro, em torno de 29°C (figura 4.2.1a). No ano seguinte (2012), obteve-se a mesma temperatura média de 29°C entre os meses de fevereiro e março. Os valores mínimos foram em julho de 2010 (7°C) e julho de 2011 (5°C) (valores não mostrados). Durante o período de cultivo do arroz (outubro a março) para o ano de 2010-2011 as temperaturas médias mensais permaneceram entre 20 e 28°C e para o ano de 2011-2012, entre 21 e 26°C, sendo que a normal climatológica, para o mesmo período em ambos os anos, entre 18 e 24°C (figura 4.2.2).

Os maiores valores médios diários de radiação PAR (figura 4.2.1 b) foram encontrados em dezembro 2010 (variando de 170 a 175 Wm⁻²) e no final de novembro e final de dezembro de 2011 em torno de 160 Wm⁻². No período de cultivo, para o ano 2010-2011, a radiação PAR foi em média 140 Wm⁻², e para o ano 2011-2012, de 150 Wm⁻².

A precipitação (figura 4.2.3) foi inferior a 50 mm em 5 meses do período analisado. A precipitação total acumulada para os 683 dias foi de 2.472,4 mm, enquanto que para o período de cultivo do arroz para o ano 2010-2011 foi de 454,46 mm e para o ano de 2011-2012 foi de 618,62 mm. Os valores acumulados de precipitação, a partir dos dados observacionais foram inferiores, em 13 meses, a normal climatológica, e 9 meses acima da normal climatológica. Ocorreram falhas durante a aquisição dos dados observacionais, essas lacunas foram preenchidas com os dados de precipitação da estação de Caçapava do Sul (INMET).

A figura (4.2.4) mostra a intensidade da velocidade e direção do vento. O vento predominante neste sítio, durante o período de estudo (junho 2010 a março 2012), foi da direção leste (E) em torno de 13,5% e de leste-nordeste (ENE), em torno de 12%. Para o período de cultivo do arroz, os ventos mais frequentes também

provinham de E (15%) e de ENE (12%) (figura 4.2.5). O mesmo pode ser descrito para a safra seguinte (ano 2011-2012) com dados aqui não mostrado. A velocidade do vento mais frequente, tanto para o período de cultivo quanto para o período completo de estudo, foram de $0-2\text{ms}^{-1}$ (amarelo) e de $2-4\text{ms}^{-1}$ (vermelho).



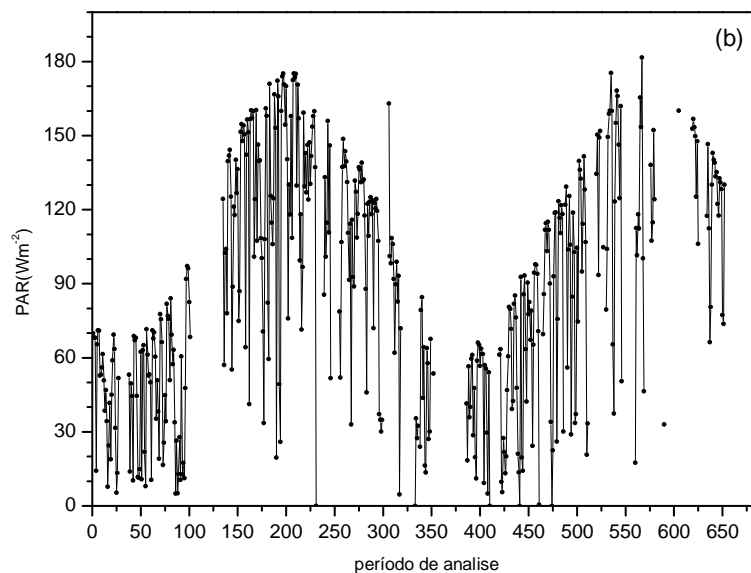


Figura 4.2.1 - Médias diárias das variáveis meteorológicas a partir de dados observacionais durante o período de estudo no sítio de Cachoeira do Sul (junho de 2010 a março de 2012). (a) temperatura do ar e (b) radiação fotossinteticamente ativa (PAR).

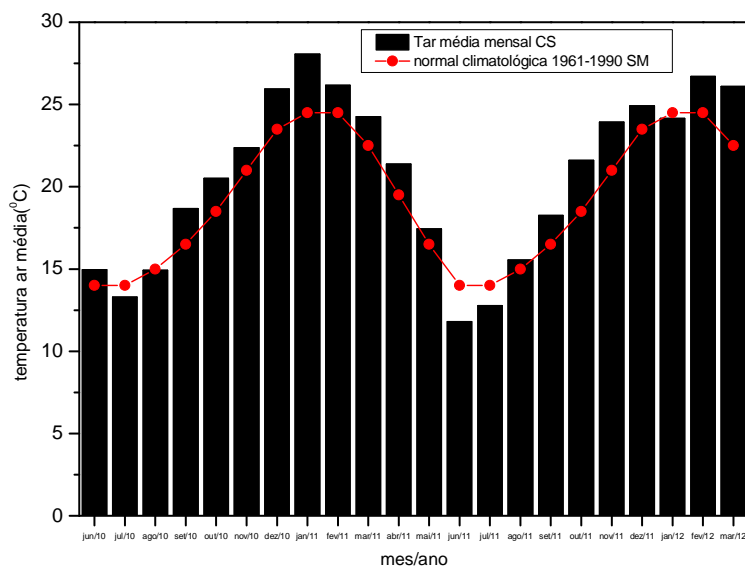


Figura 4.2.2 - Valores médios mensais da temperatura do ar para o período de estudo (junho de 2010 a março de 2012). As barras em preto indicam a média mensal da temperatura do ar no sítio de Cachoeira do Sul (CS) a partir dos dados observacionais. Os pontos em vermelho indicam a normal climatológica da temperatura média do ar para a estação do INMET de Santa Maria (SM), período de 1961-1990.

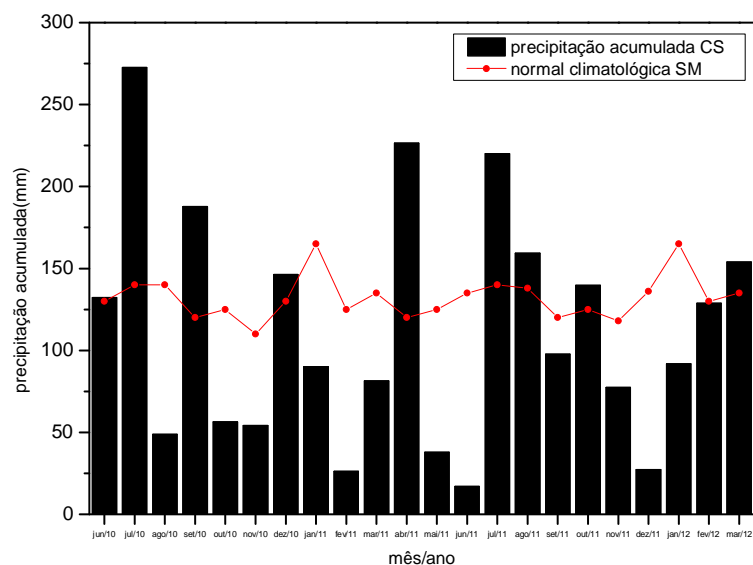


Figura 4.2.3 - Valores acumulados mensais para a precipitação durante o período de estudo (junho de 2010 a março de 2012). As barras em preto indicam a precipitação acumulada no sítio de Cachoeira do Sul (CS) a partir dos dados observacionais. Os pontos em vermelho indicam a normal climatológica da precipitação para a estação do INMET de Santa Maria (SM), período de 1961-1990.

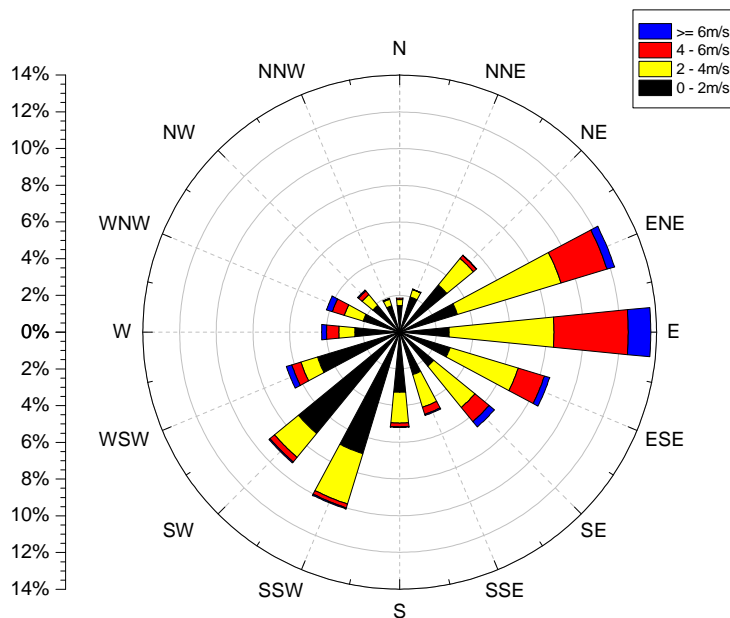


Figura 4.2.4 - Direção e velocidade média do vento durante o período de estudo (junho de 2010 a março de 2012) para o sítio de Cachoeira do Sul.

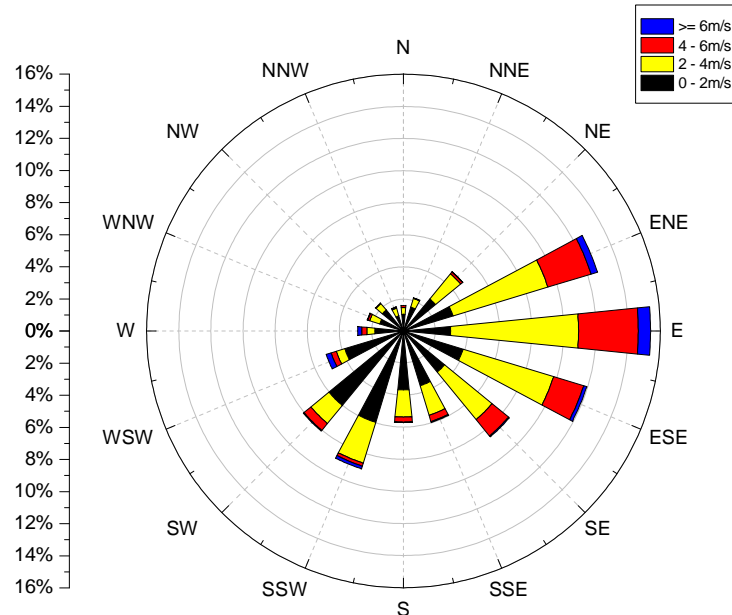


Figura 4.2.5 - Direção e velocidade média do vento durante o período de cultivo do arroz (outubro de 2010 a março de 2011) para o sítio de Cachoeira do Sul.

4.2.2 Índice de área foliar (IAF)

O índice de área foliar (IAF) foi estimado, para o sítio de Cachoeira do Sul, a partir de amostras destrutivas de cinco plantas escolhidas aleatoriamente na parcela do campo de arroz, onde se encontra a torre micrometeorológica. Com o auxílio do LI-3000A *Portable Área Meter*, foram realizadas as medidas do IAF para cada planta, feitas as médias dessas cinco plantas e extrapolado para cada metro quadrado de área. As medidas da altura da planta foram realizadas medindo com régua a distância entre o nível do solo e as folhas mais altas das plantas. Essas medidas de IAF e altura das plantas foram feitas a cada coleta de dados observacionais durante as visitas ao sítio.

A figura (4.2.6) mostra o IAF para ambos os anos de cultivo de arroz (2010-2011 e 2011-2012). Verificou-se que na safra 2010-2011, o IAF aumentou significativamente 60 dias após o plantio e atingiu o máximo de $2,99\text{m}^2\text{m}^{-2}$ durante a fase reprodutiva (R). Na safra seguinte (2011-2012), o IAF manteve-se entre $1,02$ e $1,4\text{m}^2\text{m}^{-2}$, entre os primeiros 74 dias de cultivo, logo após reduz para $1,17\text{m}^2\text{m}^{-2}$

(84 dias) e aumenta rapidamente, atingindo o máximo de $3,35\text{m}^2\text{m}^{-2}$. As medidas de IAF, para a safra 2011-2012, cessaram no final da fase reprodutiva devido ao amadurecimento das plantas de arroz, no local onde foram realizadas as medidas. Na safra 2010-2011, a planta de arroz atingiu uma altura máxima de 0,69m no final da fase reprodutiva e na safra 2011-2012, 0,56m, em torno de 10 dias antes do final da fase reprodutiva (figura 4.2.7). Alguns estudos em cultura do arroz também relataram o IAF, como por exemplo: Saito et al. (2005), encontraram o máximo de IAF de $6,3\text{m}^2\text{m}^{-2}$ e altura de 1,14m; Campbell et al. (2001), obtiveram para o IAF, na fase reprodutiva, $4,2\text{m}^2\text{m}^{-2}$; Miyata et al. (2000) em campo de arroz no Japão, com amostras destrutivas da planta, encontraram IAF de $3,08\text{m}^2\text{m}^{-2}$ e 0,72m de altura e Moon et al.(2003) em um sítio de arroz irrigado, na Coréia, encontraram máximo de $4,5\text{m}^2\text{m}^{-2}$ para o IAF.

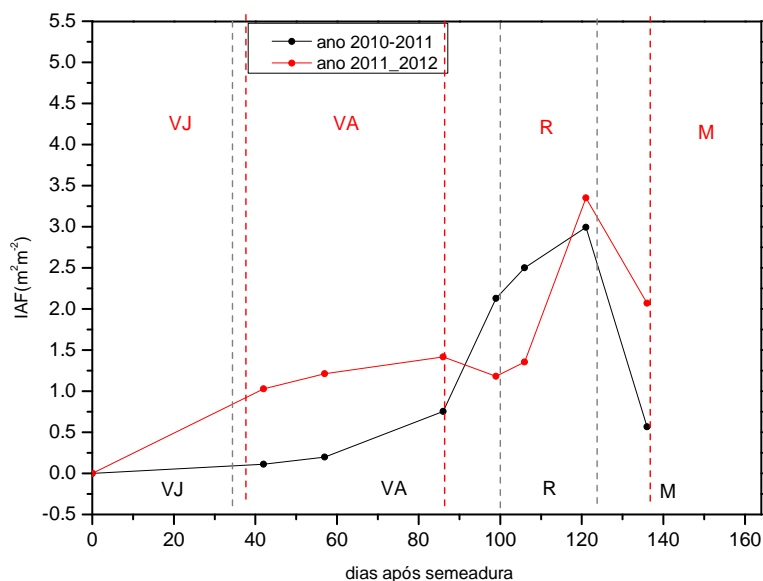


Figura 4.2.6 - Índice de área foliar (IAF) para os dois anos de cultivo do arroz no sítio de Cachoeira do Sul. Os círculos em preto indicam as medidas do IAF para o período de cultivo do arroz no ano 2010-2011 e os círculos em vermelho, para o ano 2011-2012. As linhas verticais tracejadas (preto=2010-2011, vermelho=2011-2012) separam as fases de desenvolvimento do arroz: VJ=vegetativa jovem, VA=vegetativa adulta, R=reprodutiva e M=maturação.

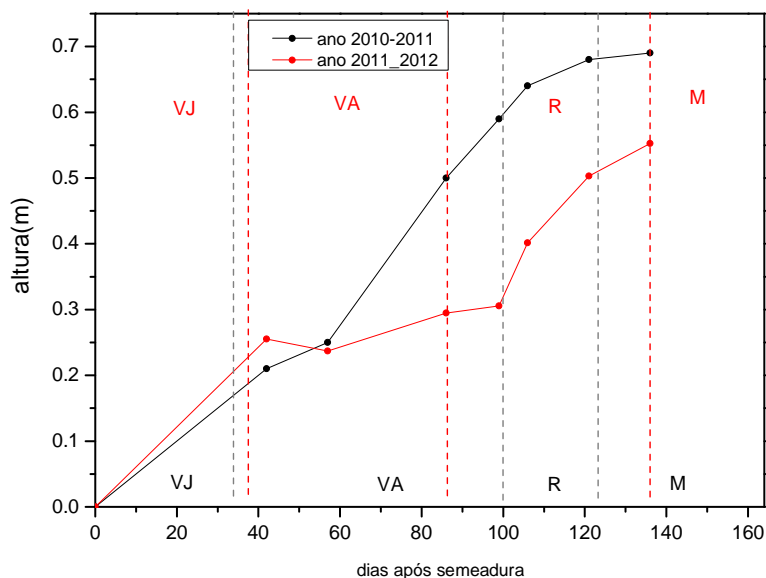


Figura 4.2.7 - Altura da planta de arroz para os dois anos de coleta de dados no sítio de Cachoeira do Sul. Os círculos em preto indicam as medidas da altura para o período de cultivo do arroz no ano 2010-2011 e os círculos em vermelho, para o ano 2011-2012. As linhas verticais tracejadas (preto=2010-2011, vermelho=2011-2012) separam as fases de desenvolvimento do arroz: VJ=vegetativa jovem, VA=vegetativa adulta, R=reprodutiva e M=maturação.

4.2.3 Fluxos de dióxido de carbono

4.2.3.1 Ciclo médio diário de NEE

A assimilação de CO_2 variou com o desenvolvimento da cultura, exibindo uma tendência similar em cada fase durante os dois anos de cultivo de arroz no sítio de Cachoeira do Sul.

Durante a VJ (figura 4.2.8a e figura 4.2.9a) para os dois anos de cultivo (2010-2011 e 2011-2012) o NEE manteve-se positivo, pois neste período as plantas ainda são pequenas. Segundo Nishimura et al. (2008), nesta fase, a quantidade de CO_2 absorvido pelas plantas de arroz ainda é inferior ao liberado pela respiração dessas plantas e por microorganismos do solo. Ainda nesta fase, os campos de arroz irrigado têm como produto predominante da decomposição anaeróbica, o CH_4

(metano) e não o CO_2 (Alberto et al., 2009). O crescente aumento do fluxo de CH_4 durante o período irrigado é atribuído a emissão gasosa do metano que fica aprisionado no solo (Nishimura et al., 2008). Em solos alagados, como é o caso da cultura de arroz no RS, o CH_4 é resultante da decomposição de compostos orgânicos por bactérias metanogênicas (Lai, 2009).

Na VA, quando as plantas já estão maiores (mais altas – ver figura 4.2.7), foi observado significativo NEE negativo. No ano 2010-2011, para VA, obteve-se absorção em torno de $-15 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (figura 4.2.8(b)) e para o ano seguinte, 2011-2012, em torno de $-10 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (figura 4.2.9b). Os maiores valores de NEE foram encontrados durante R. Na cultura de 2010-2011, obteve-se, em média, máximo de absorção de $-25 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ entre 11h30min e 13h (figura 4.2.8c). No cultivo de 2011-2012, o máximo de NEE negativo foi encontrado entre 11h30min e 13h30min, em torno de $-21 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (figura 4.2.9c). Na fase final do cultivo do arroz (M), quando a planta começa a amadurecer, o NEE absorvido decresceu significativamente. Para M de 2010-2011, o NEE foi, em média, $-9 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ e na M de 2011-2012, em torno de $-7,5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Para o período noturno, o NEE foi em média $5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ durante as fases de crescimento da planta, com exceção da VJ no ano de 2010-2011 (em torno de $2,5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

O comportamento de PAR é mostrado juntamente com o NEE para cada ano de cultivo do arroz (2010-2011 – figura 4.2.8, 2011-2012 – figura 4.2.9). Para a fase (R) em que o arroz necessita de maior radiação, no ciclo de cultivo do ano 2011-2012, se obteve os maiores índices de PAR, chegando a atingir um pico de 479Wm^{-2} (figura 4.2.9c).

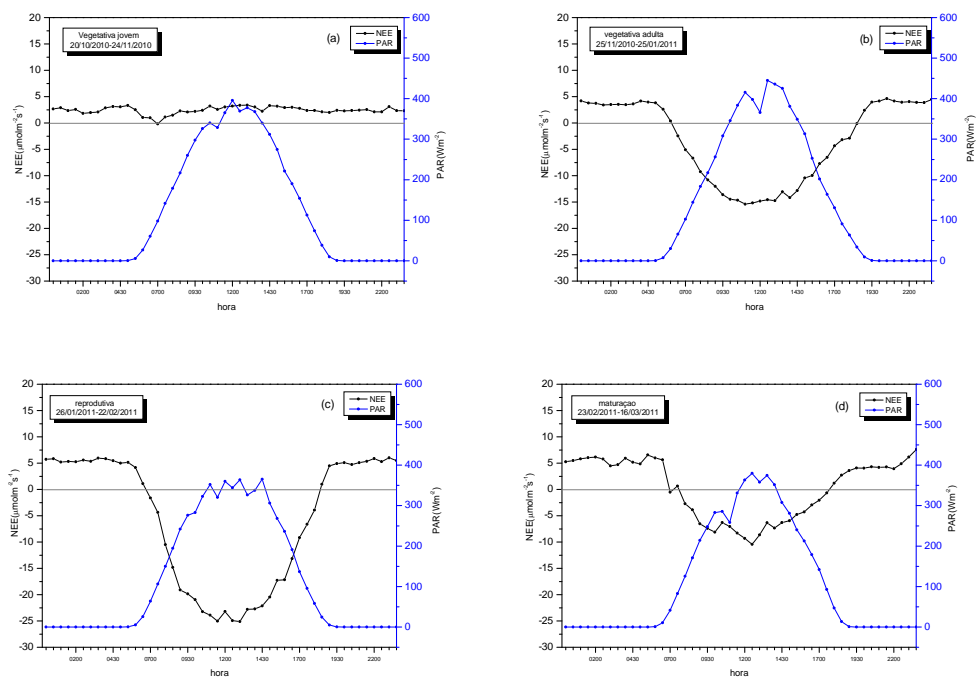


Figura 4.2.8 - Variações do ciclo médio diário dos intervalos de 30min de NEE e PAR para cada fase de desenvolvimento do arroz durante o período de cultivo no ano 2010-2011 para o sítio de Cachoeira do Sul. (a) fase vegetativa jovem (VJ), (b) fase vegetativa adulta (VA), (c) fase reprodutiva, (d) fase de maturação.

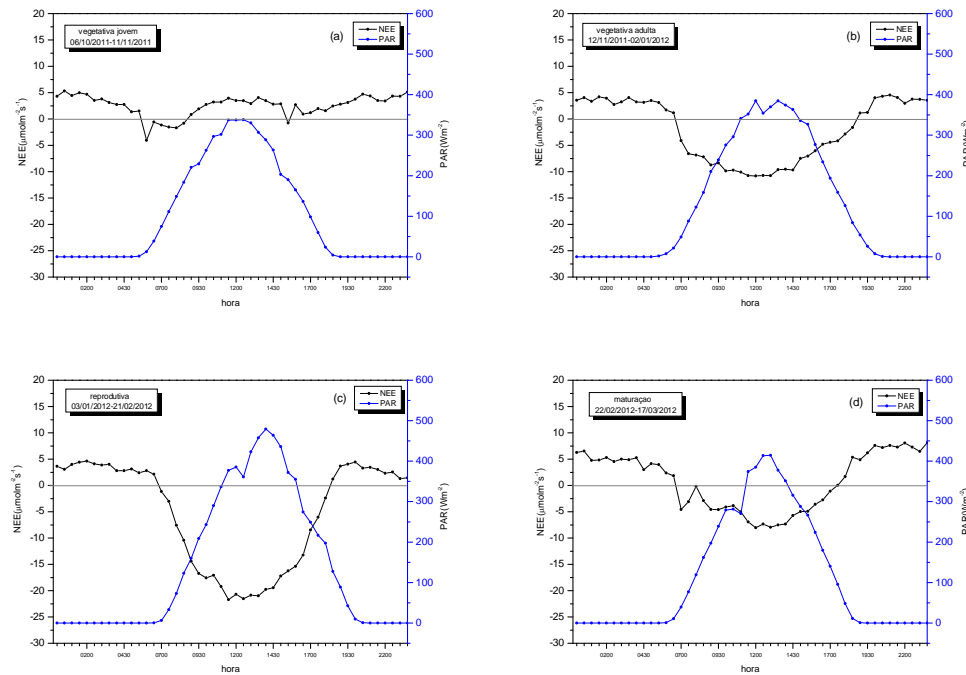


Figura 4.2.9 - Variações do ciclo médio diário dos intervalos de 30min de NEE e PAR para cada fase de desenvolvimento do arroz durante o período de cultivo no ano 2011-2012 para o sítio de Cachoeira do Sul. (a) fase vegetativa jovem (VJ), (b) fase vegetativa adulta (VA), (c) fase reprodutiva, (d) fase de maturação.

4.2.3.2 Variações diárias de NEE, GPP e R_e

Diferentes variações diárias de NEE, GPP e R_e podem ser observadas durante dois ciclos de cultivo de arroz irrigado no sítio de Cachoeira do Sul entre os anos de 2010 e 2012 (figura 4.2.10). As lacunas faltantes foram preenchidas utilizando a teoria descrita subitem 2.4. Foram 683 dias de análise de dados. O ciclo de cultivo do arroz no ano 2010-2011 compreende 148 dias e no ano de 2011-2012, foram 164 dias.

Dividimos o período total de análise em períodos com arroz e períodos sem arroz (pousio: P_1 (141 dias), P_2 (63 dias), P_3 (140 dias), P_4 (15 dias)). Durante todos os períodos de pousio, o campo de arroz não apresenta solo nu (com exceção, após a colheita), mas sim vegetação que cresce espontaneamente ou até mesmo arroz que brota novamente de sementes que germinam. Observaram-se reduções de fluxos de C após a colheita da cultura. Ocorrem períodos durante o pousio em que

há maiores absorções e emissões de C, provavelmente seja devido à assimilação da vegetação que se desenvolve espontaneamente. Durante P_1 e P_2 , o NEE e R_e encontram-se em torno de $2\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e a GPP, cerca de $-1\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$. No entanto, para P_3 , observa-se maiores valores de NEE e R_e , em média, $3\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e a GPP permanece em torno de $-1\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$. Com exceção para o início de P_3 onde NEE e R_e encontram-se em torno de $1\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, provavelmente devido à colheita da cultura.

A GPP diária foi pequena durante a VJ (40 dias após o plantio) para os dois ciclos de cultivo do arroz. No ciclo de 2010-2011, a GPP foi em média $-1\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e em 2011-2012 foi de $-2\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$. Aumentou a partir da VA, chegando ao máximo durante a R, em torno de $-14,2\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ para o ciclo de 2010-2011 e $-13,36\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ para 2011-2012. Em seguida, decresce até $-3\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ (2010-2011) e $-4\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ (2011-2012), antes da colheita.

A R_e tem um aumento significativo, também a partir da VA, como consequência do desenvolvimento da cultura. Atinge valores máximos que chegam a $7,22\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $7,33\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ para o cultivo de 2010-2011 e 2011-2012, respectivamente.

O campo de arroz, em ambos os ciclos de cultivo, começou a atuar como sumidouro de C no início da VA e atingiu o máximo de absorção de $-11,51\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ no ciclo de 2010-2011 e de $-9,56\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ no ciclo de 2011-2012. Durante a VJ, nos dois ciclos e após a colheita de 2010-2011, o campo de arroz atuou como uma fonte líquida de C.

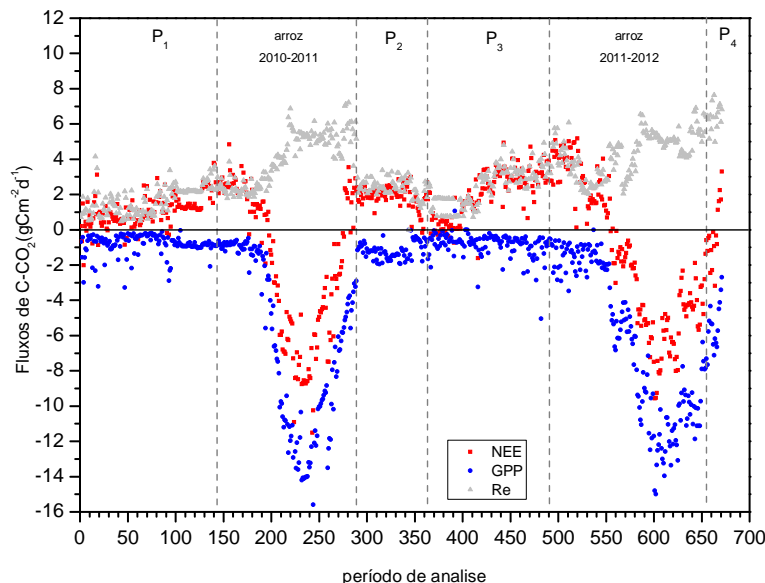


Figura 4.2.10 - Médias diárias de NEE, GPP e R_e para o período de estudo no sítio de Cachoeira do Sul (01 junho 2010 a 25 março 2012). Os quadrados (vermelho) representam o NEE, os círculos (azul) a GPP e os triângulos (cinza) a R_e . As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz.

4.2.3.3 Acumulado de NEE, GPP e R_e para o período de cultivo

O total de carbono acumulado para os dois ciclos de cultivo do arroz, no sítio de Cachoeira do Sul, é apresentado na figura (4.2.11). O NEE acumulado para o ano de 2010-2011 foi de $-282,53 \text{ gCm}^{-2}$ e para o ano de 2011-2012 foi de $-279,69 \text{ gCm}^{-2}$, mostrando que em ambos os ciclos de cultivo, o campo de arroz atuou como um sumidouro de C. A GPP acumulada durante o período de cultivo do arroz foi de $-933,40 \text{ gCm}^{-2}$ e de $-1062,64 \text{ gCm}^{-2}$, para 2010-2011 e 2011-2012, respectivamente. A R_e acumulada para os dois ciclos do arroz, foi de $597,05 \text{ gCm}^{-2}$ para 2010-2011 e de $716,58 \text{ gCm}^{-2}$ para 2011-2012.

A figura (4.2.12) mostra o NEE total acumulado para os 683 dias de análise. Durante os períodos de pousio (P_1 (141 dias), P_2 (63 dias), P_3 (140 dias), P_4 (15 dias)) o campo atua como uma fonte de C ($P_1=152,55 \text{ gCm}^{-2}$, $P_2=126,93 \text{ gCm}^{-2}$,

$P_3=271,74\text{gCm}^{-2}$ e $P_4=-3,33\text{gCm}^{-2}$). Ao final do período de análise (683 dias), a área de cultivo de arroz irrigado neste sítio, atuou como uma fonte de C ($19,95\text{gCm}^{-2}$).

Os valores de NEE acumulado para os períodos de pousio e de cultivo do arroz, nos dois ciclos da cultura, são mostrados na figura (4.2.13). Observa-se que nos períodos sem arroz, o campo atuou como fonte de C, enquanto que nos períodos com a cultura, atuou como sumidouro de C.

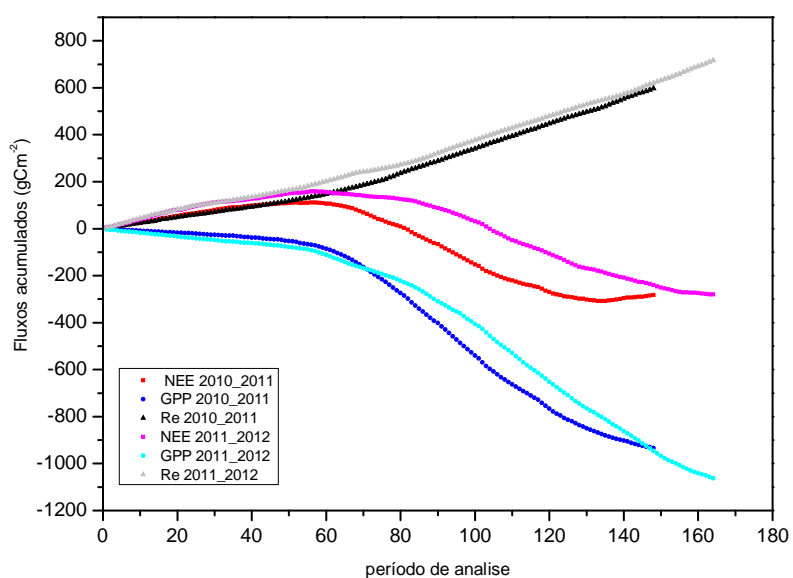


Figura 4.2.11 - Total de C acumulado para o período de cultivo do arroz no sítio de Cachoeira do Sul (2010-2011: 20 outubro 2010 a 16 março 2011, 2011-2012: 06 outubro 2011 a 17 março 2012). Os quadrados representam o NEE de 2010-2011(vermelho) e 2011-2012 (rosa), respectivamente. Os círculos representam a GPP de 2010-2011 (azul escuro) e 2011-2012 (azul claro). Os triângulos representam a R_e de 2010-2011 (preto) e 2011-2012 (cinza).

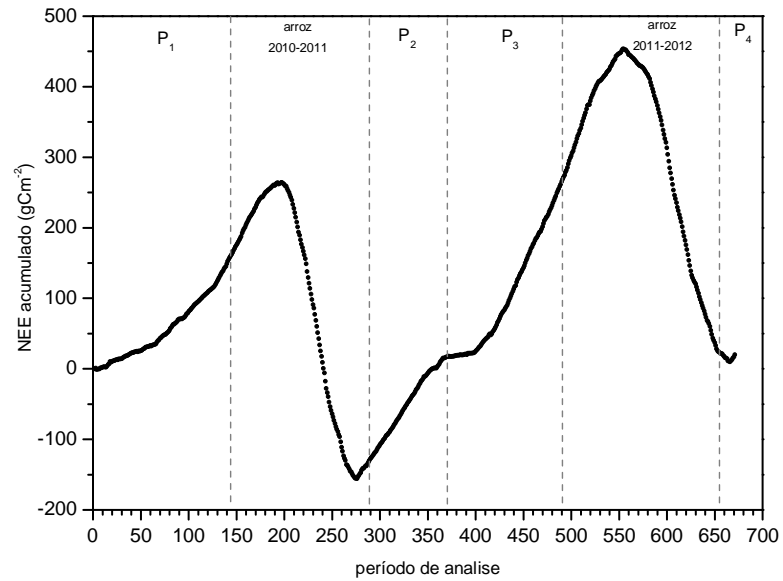


Figura 4.2.12 - NEE total acumulado para o período de estudo no sítio de Cachoeira do Sul (01 junho 2010 a 25 março 2012). As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz.

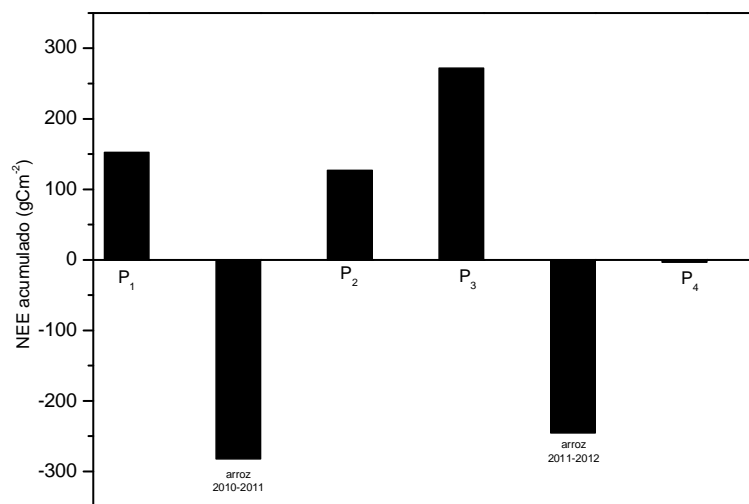


Figura 4.2.13 - NEE total acumulado para os períodos com e sem arroz no sítio de Cachoeira do Sul (683 dias de análise).

Capítulo 5

5 Análise dos Sítios Experimentais

Neste capítulo fez-se uma avaliação geral dos fluxos de C-CO₂ nos dois sítios experimentais de cultivo de arroz irrigado na região central do RS. Discutiu-se a relação dos fluxos médios e acumulados nas áreas de nosso estudo.

5.1 Variações diárias de NEE, GPP e R_e

A figura (5.1) mostra as variações diárias de NEE para o sítio experimental de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS), ambos de cultivo de arroz. Observa-se para os períodos de pousio um comportamento similar de NEE para os dois sítios (em torno de 1 gCm⁻²d⁻¹), com exceção para o ano de 2011-2012 que apresentou taxas mais elevadas tanto de NEE (em média, 2,5 gCm⁻²d⁻¹) quanto de R_e (2,5 gCm⁻²d⁻¹). No período de cultivo, para o sítio de PS, NEE atinge o máximo de -7,69 gCm⁻²d⁻¹, enquanto que para CS, chega a -11,51 gCm⁻²d⁻¹ no ciclo de 2010-2011 e -9,56 gCm⁻²d⁻¹ no ciclo de 2011-2012. Nossos resultados foram semelhantes aos encontrados por alguns autores, como: Alberto et al. (2009), também em campo de arroz irrigado em Los Baños (Filipinas), encontraram NEE máximo de -7,6 gCm⁻²d⁻¹. Nishimura et al (2008) em parcelas de arroz no Japão, encontraram máximo de absorção de -13,09 gCm⁻²d⁻¹. Saito et al. (2005), em campo de arroz em área rural de Tsukuba (Japão) obtiveram NEE máximo em torno de -10,6 gCm⁻²d⁻¹. Moon et al (2002), na Coreia, encontraram -12 gCm⁻²d⁻¹ de absorção máxima. Campbell et al. (2001) encontraram em área de cultivo de arroz, no Texas (EUA), -13,9 gCm⁻²d⁻¹.

A figura (5.2) mostra a evolução diária de GPP e R_e para os dois sítios experimentais de nosso estudo. A R_e durante o pousio, para PS, ficou em média,

$2\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$. Para CS, a R_e no ano de 2011-2012 foi superior em quase 60% a R_e no ano anterior. Durante o período de cultivo, a R_e atinge $6,11\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ no sítio de PS e $7,22\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $7,33\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ no sítio de CS, nos ciclos de 2010-2011 e 2011-2012, respectivamente. Alberto et al. (2009), Saito et al. (2005) e Campbell et al. (2001) encontraram máximo de R_e em torno de $9,5\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, variação entre $5,45$ e $9,5\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $8,5\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, respectivamente. A GPP durante o período de pousio, para o sítio de CS é semelhante nos dois anos de análise e inferior a quase 50% no sítio de PS. Durante o cultivo do arroz, a GPP em CS foi superior a PS. Obteve-se picos máximos de GPP, durante o cultivo, de $-12,51\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ para PS e de $-14,2\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $-13,36\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ para CS nos dois anos consecutivos de análise. Valores máximos de GPP, em campos de arroz irrigado, também foram relatados por Alberto et al. (2009), Saito et al. (2005) e Campbell et al. (2001), em torno de $-14,5\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, $-13,6\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $-21,08\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, respectivamente.

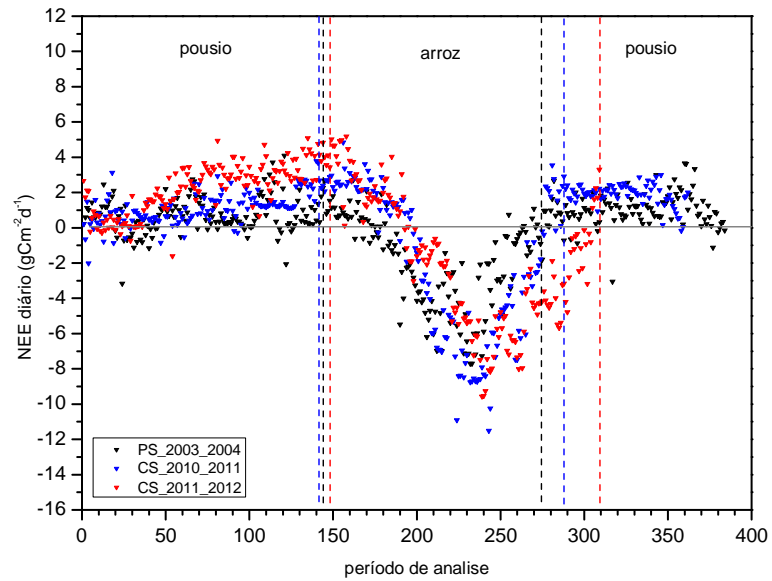


Figura 5.1 - Médias diárias de NEE para os dois sítios de estudo, na região central do RS. Os triângulos (preto) representam o NEE de Paraíso do Sul (PS) para o ano de 2003-2004, triângulos (azul) NEE de Cachoeira do Sul (CS) para o ano de 2010-2011 e os triângulos (vermelho) NEE de Cachoeira do Sul (CS) para o ano de 2011-2012. As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz (preto - PS, azul - CS-2010-2011, vermelho - CS-2011-2012).

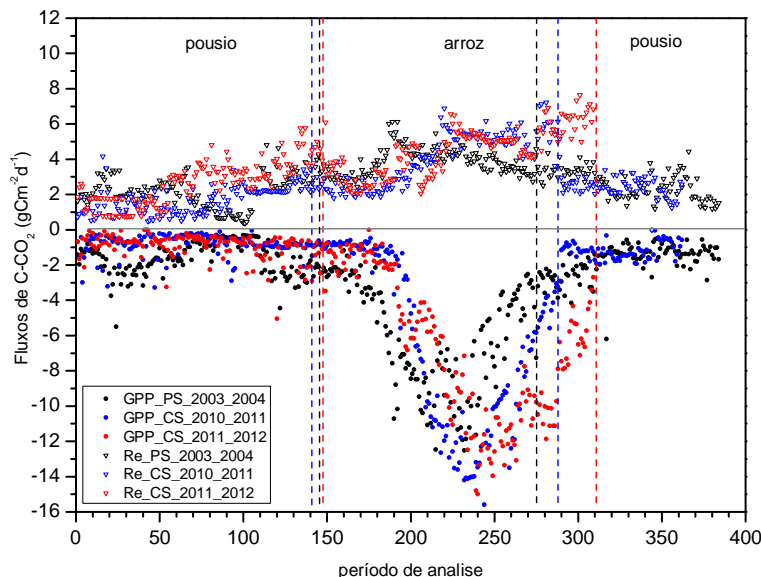


Figura 5.2 - Médias diárias de GPP e R_e para os dois sítios de estudo, na região central do RS. Os círculos representam a GPP e os triângulos a R_e . Em preto têm-se os dados observacionais de Paraíso do Sul para o ano de 2003-2004, em azul e vermelho, os dados observacionais de Cachoeira do Sul, para o ano de 2010-2011 e de 2011-2012, respectivamente. As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz (preto - PS, azul - CS-2010-2011, vermelho - CS-2011-2012).

5.2 Acumulado de NEE, GPP e R_e

A figura (5.3) apresenta os valores acumulados dos fluxos de C-CO_2 durante o período de cultivo do arroz nos sítios de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS). Foram analisados 132 dias de cultivo para o sítio de PS e para o sítio de CS foram, 148 dias no ciclo de 2010-2011 e 164 dias no ciclo 2011-2012.

Observa-se que durante o cultivo, ambos os campos de arroz, atuam como sumidouro de C (tabela 5.1). O NEE acumulado no sítio de CS foi semelhante em ambos os ciclos e praticamente igual ao sítio de PS. A GPP acumulada no sítio de CS, no ciclo de 2010-2011 foi inferior em 12% ao ciclo de 2011-2012 e superior em 15% a GPP no sítio de PS. A R_e acumulada foi semelhante no sítio de PS e no ciclo de 2010-2011 de CS, mas inferior ao ciclo de 2011-2012. Provavelmente, as taxas superiores de GPP e R_e no ciclo de 2011-2012 no sítio de CS são atribuídas à

intensa fotossíntese e ao aumento do IAF (ver figura 4.2.6) que foi superior durante a fase vegetativa, chegando ao máximo de $3,35 m^2 m^{-2}$ na reprodutiva. Um fator que favorece a intensificação da fotossíntese é a PAR. Essa radiação foi consideravelmente mais elevada no ciclo de 2011-2012 do que no ciclo anterior (na fase reprodutiva) contribuindo com o aumento da taxa de GPP (ver figura 4.2.8c e figura 4.2.9c). Outro fator a ser considerado, são as elevadas temperaturas que foram superiores, durante o período de cultivo, no ano de 2011-2012, variando entre 37 e 38^oC (valores máximos não mostrados).

Os valores de NEE encontrados em nosso estudo foram semelhantes aos encontrados por Alberto et al. (2009) ($-258 gCm^{-2}$) também em campo de arroz irrigado. Porém, nossos resultados são cerca de 30% menor que os encontrados por Saito et al. (2005) ($-397,64 gCm^{-2}$) e Nishimura et al. (2008) ($-437 gCm^{-2}$ no primeiro ciclo de cultivo – ano 2002, $-394 gCm^{-2}$ no segundo ciclo – ano 2003), provavelmente pelas diferenças de práticas de cultivo, como manejo de água e adubação, sendo que estas observações requerem maior atenção para estudos futuros. Hutchinson et al. (2007) relataram que escolhendo diferentes práticas de manejo agrícola podem-se reduzir as emissões de CO₂, como por exemplo, uso mais eficiente de fertilizantes, períodos de pousio mais curtos, rotação de culturas, etc.

Durante os períodos de pousio, em ambos os sítios, observa-se que os campos atuam como fonte de C (figura 5.4). Segundo Nishimura et al. (2008), neste período observa-se fluxos positivos de CO₂ devidos as emissões de CO₂ do solo. No sítio de CS, o NEE (pousio) foi superior ao do sítio de PS. No sítio de CS (pousio), o NEE em 2010 foi 15% maior que no ano posterior. A GPP e a R_e, durante o pousio, foi superior em PS, cerca de 40% e 60%, respectivamente. No sítio de CS, durante o pousio, a GPP e a R_e foram semelhantes.

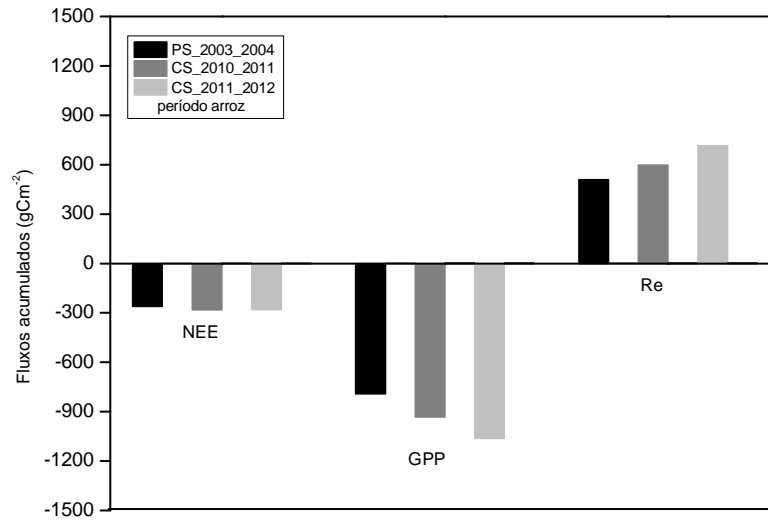


Figura 5.3 - Total acumulado de NEE, GPP e R_e para o período de cultivo do arroz nos sítios experimentais de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS).

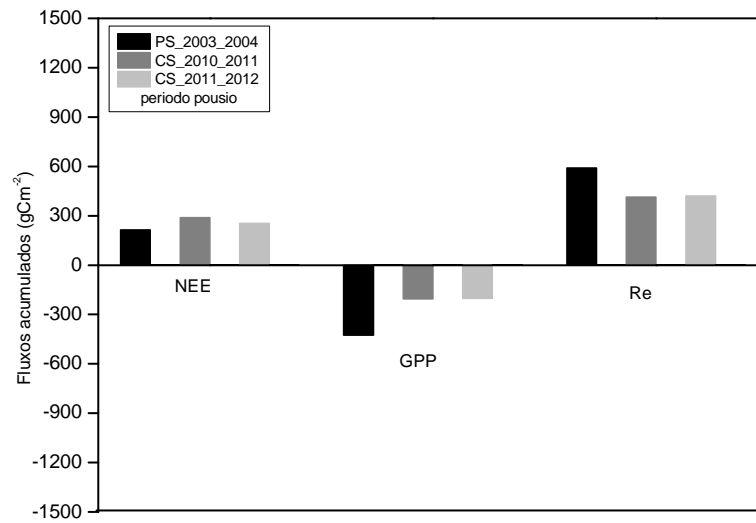


Figura 5.4 - Total acumulado de NEE, GPP e R_e para o período de pousio nos sítios experimentais de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS).

Tabela 5.1 - Total acumulado de C nos sítios de nosso estudo durante o período de cultivo do arroz (unidade: gCm^{-2})

	Paraíso do Sul 2003-2004	Cachoeira do Sul 2010-2011	Cachoeira do Sul 2011-2012
Troca líquida no ecossistema (NEE)	-270,53	-282,53	-279,69
Produção primária bruta (GPP)	-821,19	-933,40	-1062,64
Respiração no ecossistema (R_e)	527,59	597,05	716,58

Os fluxos acumulados durante o período completo de análise, nos sítios experimentais de Paraíso do Sul (385 dias) e Cachoeira do Sul (2010-2011: 365 dias e 2011-2012: 318 dias) são mostrados na figura (5.5). O sítio de PS, ao final de um ano de análise, com períodos intercalados com arroz e sem arroz, foi considerado sumidouro de C ($-45,90\text{gCm}^{-2}$). O sítio de CS foi considerado fonte de C, ao final de cada ano de análise. Para o ano de 2010-2011, o NEE acumulado foi de $6,55\text{gCm}^{-2}$ e para o ano de 2011-2012, $13,39\text{gCm}^{-2}$. A GPP e a R_e anual foram semelhantes em ambos os sítios e em ambos os ciclos (CS). O sítio de PS, ao final do período total de análise (385 dias) foi considerado sumidouro de C ($-45,90\text{gCm}^{-2}$), enquanto que o sítio de Cachoeira do Sul no total de 683 dias de análise, foi considerado fonte de C ($19,94\text{gCm}^{-2}$) (figura 5.6). Embora essa comparação não seja a mais adequada, pois temos dois ciclos de cultivo no sítio de CS enquanto que em PS apenas um ciclo, isso nos revela que períodos longos de pousio contribuem consideravelmente para os acumulados totais devido à predominância de fluxos positivos.

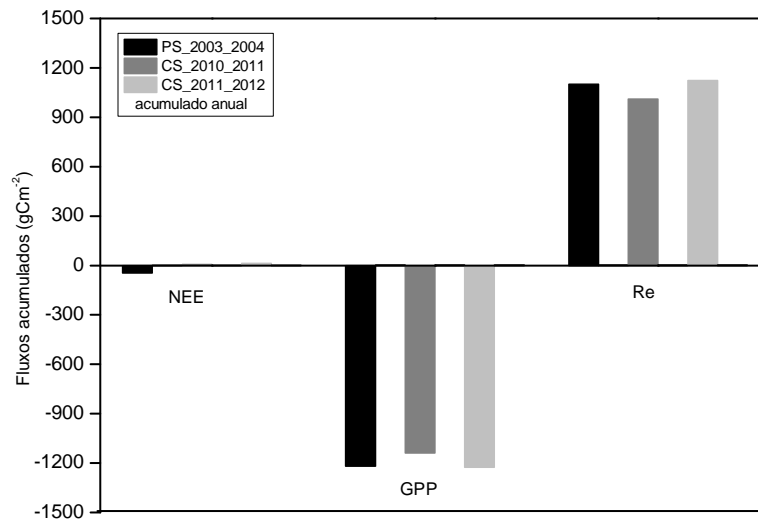


Figura 5.5 - Total acumulado de NEE, GPP e R_e para período completo de análise nos sítios experimentais de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS).

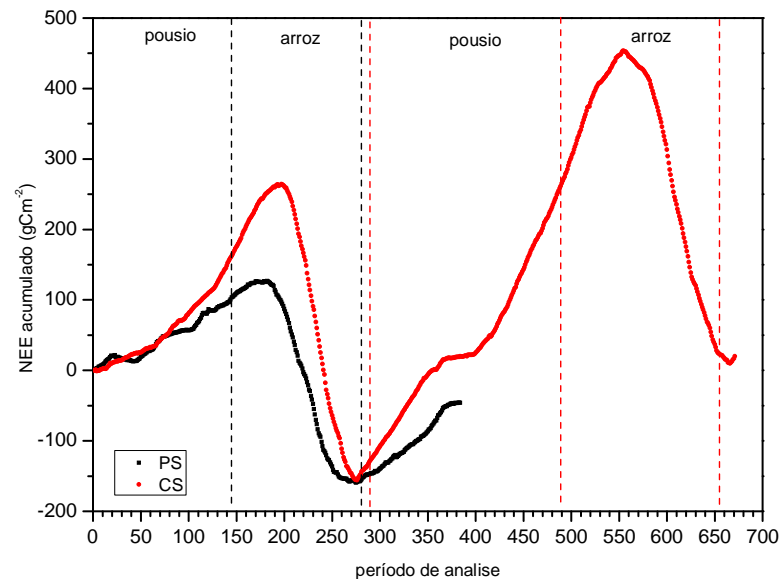


Figura 5.6 - Total acumulado de NEE para período completo de análise nos sítios experimentais de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS). Os círculos em preto representam PS e os círculos em vermelho representam CS. As linhas verticais tracejadas separam os períodos com e sem arroz (preto - PS, vermelho - CS).

Capítulo 6

6 Conclusões e Recomendações

É importante avaliar as trocas de C-CO₂ em campos de arroz, levando em conta que esta cultura é de extrema importância na produção de grãos no país. Neste sentido, buscou-se estimar quantitativamente as trocas de C-CO₂ nesse ecossistema.

Os fluxos de C-CO₂ foram analisados em dois sítios experimentais de cultivo de arroz irrigado na região central do RS, no sul do Brasil (Paraíso do Sul e Cachoeira do Sul). Foram utilizados dados observacionais obtidos através do método de covariância de vórtices (EC) e após o preenchimento das lacunas desses dados. Os dados observacionais compreendem 385 dias, para o sítio de Paraíso do Sul (julho de 2003 a julho de 2004) e 683 dias para o sítio de Cachoeira do Sul (junho de 2010 a março de 2012).

A partir dos resultados foi possível concluir que durante o cultivo do arroz, o NEE acumulado no sítio de CS foi semelhante nos dois ciclos da cultura. No ciclo de 2010-2011, o NEE foi de -282,53gCm⁻² enquanto que no ciclo posterior foi de -279,69gCm⁻². O período de cultivo em PS foi semelhante ao de CS (-270,53gCm⁻²). A GPP e a R_e foram superiores no sítio de CS com taxas mais elevadas no ciclo de 2011-2012 (CS-2010-2011: GPP= -933,40gCm⁻² e R_e= 597,05gCm⁻², CS-2011-2012: GPP= -1062,64gCm⁻² e R_e= 716,58gCm⁻², PS-2003-2004: GPP= -821,19gCm⁻² e R_e= 527,59gCm⁻²). Assim, as diferenças encontradas em dois ciclos da cultura, no mesmo sítio, atribuem-se as condições ambientais e a capacidade fotossintética da planta.

No sítio de PS, o NEE foi negativo durante o dia e positivo à noite, em todas as fases de desenvolvimento da planta. Porém, no sítio de CS, na VJ o campo de arroz atuou como fonte de C nos dois ciclos da cultura. O NEE foi negativo a partir da VA até final da M.

O total de C-CO₂ acumulado para o período completo de análise foi distinto entre os sítios. O sítio de PS foi considerado sumidouro de C, enquanto que o sítio de CS, fonte de C. Essa diferença ocorreu devido aos fluxos positivos na VJ e aos maiores valores encontrados durante os períodos de pousio (no sítio de CS). Observaram-se maiores valores acumulados de GPP e R_e no sítio de PS durante o pousio, devido à ação fotossintética e respiratória da planta que cresceu espontaneamente nesta área, enquanto que no sítio de CS, neste período sem arroz, o gado fica a solta no campo (informações do proprietário).

A contribuição deste trabalho foi a estimativa da troca líquida de C em área de cultivo de arroz irrigado, na qual áreas agrícolas estão ganhando mais destaque em estudos relacionados a emissões de CO₂.

Como propostas de trabalhos futuros são apresentadas as seguintes sugestões:

- Realizar implementações nas equações empíricas utilizadas no preenchimento das lacunas nos dados observacionais, como por exemplo, incorporar o IAF e a umidade decorrente da permanente irrigação.
- Estimar as emissões de CO₂ do solo para uma melhor compreensão do sistema solo-planta-atmosfera.
- Acrescentar a estimativa dos fluxos de CH₄.
- Extrapolar os resultados desses dois sítios para uma escala regional.

Referências Bibliográficas

ACEVEDO, O.C. et al. Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes? **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p. 1-10, 2009.

ALBERTO, M.C.R. et al. CO₂/heat fluxes in rice fields: comparative assessment of flooded and non-flooded in the Philippines. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p. 1737-1750, 2009.

ARROZ IRRIGADO: RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS DA PESQUISA PARA O SUL DO BRASIL / SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO; IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, XXVI REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 2005, Santa Maria. Anais...Santa Maria:SOSBAI, 2005. 159p.

AUBINET, M. et al. Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology. **Adv. Ecology Res.**, v. 30, p. 113-175, 2000.

AUBINET, M. et al. Estimation of the Carbon Sequestration by a Heterogeneous Forest: Night Flux Corrections, Heterogeneity of the Site and Inter-Annual Variability. **Global Change Biology**, v. 8, p.1053-1072, 2002.

BALDOCCHI, D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v.9., p.479-492, 2003.

BALDOCCHI, D.D.; HINCKS, B.B.; MEYERS, T.P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, v.69,n.5,p.1331-1340, 1988.

BALDOCCHI, D.D. et al. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. **Global Change Biology**, v.2, p. 159-168,1996.

CAMPBELL, C.S. et al. Diel and seasonal variation in CO₂ flux of irrigated rice. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.108, p. 15-27, 2001.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Brasília, 412p.,1999.

FALGE, E. et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.107, p. 43-69, 2001.

GOERGEN, R. ET al. Separação do fluxo de CO₂ em respiração e assimilação para uma cultura de soja no Sul do Brasil. In. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. A Amazônia e o clima global, 2010.

GOULDEN, M.L. et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Ecology**, v.2, p. 169-182, 1996.

GUIMARÃES, C.M.; FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P. Como a planta de arroz se desenvolve. Encarte de informações agronômicas, n.99, set.2002.

HUTCHINSON, J.J.; CAMPBELL, C.A.; DESJARDINS, R.L. Some perspective on carbon sequestration in agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.142, p.288-302, 2007.

LAI, D.Y.F. Methane dynamics in northern peatlands: A review. *Pedosphere*, v.19, p.409-421, 2009.

LASSLOP, G. et al. Separation of net ecosystem exchange into nassimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. **Global Change Biology**. v.16, p.187-208, 2010.

LEE, X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 91, p.39-49, 1998.

LEONG, W. Canopy modification and its effects on the growth and yield of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. 1980. 283 p. Thesis (Ph.D.) – Faculty of Agriculture Sciences of Ghent, Ghent, 1980.

LLOYD, J., TAYLOR, J.A. On the temperature dependence of soil respiration. **Funct. Ecology**. v. 8, p.315-323, 1994.

MEEK, D.W. et al. A generalized relationship between photosynthetically active radiation and solar radiation. **Agronomy Journal**. v.76, p.939-945, 1984.

MIYATA, A. et al. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 102, p. 287-303, 2000.

MONCRIEFF, J.B. et al. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide. **Journal of Hidrology**, v.188-189, p. 589-611, 1997.

MONTHEITH, J.L. *Vegetation and Atmosphere*. Academic. London, 1975.

MOON, B-K. CO₂ and Energy Exchange in a Rice Paddy for the Growing Season of 2002 in Hari, Korea. **Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology**, v.5, p.51-60, 2003.

NEUE, H.U. e SASS, R.L. Trace gás emissions from Rice fields. **Global Atmospheric-Biospheric Chemistry**, R.G. Prinn (Eds), p.119-147, 1994.

NISHIMURA, S. et al. Effect of land use change from paddy Rice cultivation to upland crop cultivation on soil carbon budget of a cropland in Japan. **Agriculture Ecosystems & Environment**. v.125, p.9-20, 2008.

OHTAKI, E. On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields. **Boundary Layer Meteorology**. v. 32, p.25-37, 1985.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**, 2nd Edition. London: Routledge, 1987.

PAPALE, D. e VALENTINI, R. A New Assessment of European Forests Carbon Exchanges by Eddy Fluxes and Artificial Neural Network Spatialization. **Global Change Biology**. v. 9, p.525-535, 2003.

PATTEY, E. et al. Measuring nighttime CO₂ flux over terrestrial ecosystems using eddy covariance and nocturnal layer methods. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 113, p. 145-158, 2002.

PEREIRA, A. R. e MACHADO, E. C. Análise quantitativa do crescimento de comunidade vegetal. Campinas: Instituto Agrônômico, 1987. 33p. (Boletim Técnico, 114).

SAITO, M. et al. Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.135, p. 93-109, 2005.

SAKAI, R.K. et al. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in Amazonian agricultural field. **Global Change Biology**, 10, p. 1-13, 2004.

SCHUEPP, P.H. et al. Footprint predictions of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. **Boundary Layer Meteorology**, v.50, p.355-373, 1990.

SÉRIES CULTURAS: ARROZ, 2002. ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, COMISSÃO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E COOPERATIVISMO.

STRECK, N.A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: A modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.115, n.3-4, p.139-150, 2003.

STULL, R.B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Dordrecht, NL: Kluwer Academic Press, 1988.

SUYKER, et al., 2005 Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season. **Agricultural and Forest Meteorological**, v.131, p.180-190, 2005.

TSENG, K.-H. et al. Determination of methane and carbon dioxide fluxes during the rice maturity period in Taiwan by combining profile and eddy covariance measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p.852-859, 2010.

TSUKAMOTO, O. Turbulent fluxes over paddy Field under various ponding depth. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.49, p.19-25, 1993.

VERGARA. B.S. Rice plant growth and development. In: LUH,B.S.(ed.). Rice: production and utilization. Davis: Avi, p.75-85, 1980.

ZHAO X. et al. Effects of the conversion of marshland to cropland on water and energy exchanges in northeastern China. **Journal of Hydrology**, v. 355, p. 181-191, 2008.

WEBB, E.; PEARMAN, G.: LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.106, p. 85-100, 1980.

WOHLFAHRT, G. et al. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modeling. **Agricultural and Forest Meteorological**, v. 128, p. 141-162, 2005.

ANEXO A: Modelo de dados arquivados após processamento

As ilustrações abaixo, de tabelas, exemplificam os dados que foram arquivados após o processamento do cálculo dos fluxos e de outras variáveis em janelas de 30min. Esses arquivos de saída seguem o modelo de arquivamento de dados observacionais do modelo CEOP.

Ilustração 1. Modelo de dados do arquivo de saída SFC (CEOP *Surface Meteorological and Radiation Dataset Format Definition*) - dados de saída de superfície e radiação

data	hhmm	data	hhmm	sítio	sítio	latitude	longitude	altitude	pressao	flag	Tar	flag	Tplo_or	flag	Umid_re	flag	Umid_es	flag	veloc_v	flag	
											press	Tar	Tar	Tpto	UR	UR	UE		vel		
2012/01/02	0	2012/01/02	0	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	1009.7	U	22.86	U	-999.99	M	-999.99	M	-999.99	M	1.41	U
2012/01/02	0.02083	2012/01/02	0.02083	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	1009.7	U	22.82	U	-999.99	M	-999.99	M	-999.99	M	1.44	U
2012/01/02	0.04167	2012/01/02	0.04167	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	1009.27	U	22.35	U	-999.99	M	-999.99	M	-999.99	M	1.18	U
2012/01/02	0.0625	2012/01/02	0.0625	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	1008.98	U	22.11	U	-999.99	M	-999.99	M	-999.99	M	1.36	U
2012/01/02	0.08333	2012/01/02	0.08333	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	1008.66	U	21.95	U	-999.99	M	-999.99	M	-999.99	M	1.1	U

dir_vento	flag	U_vento	flag	V_vento	flag	preci	flag	prof_gelo	flag	Rad_in	flag	Rad_ref	flag	Rad_inc	flag	Rad_ref	flag	rad_liq	flag	Tcutane	flag	PAR_inc	flag	PAR_ref	flag
dir		U		V		prec		prof_ç		curta		curta		longa		longa		radiq		Tcut		PARinc		PARref	
150.48	U	-1.23	U	-0.7	U	0	U	-999.99	M	0	U	-999.99	M	-999.99	M	-999.99	M	-30.18	U	-999.99	M	0	U	-999.99	M
167.3	U	-1.41	U	-0.32	U	0	U	-999.99	M	0	U	-999.99	M	-999.99	M	-999.99	M	-34.04	U	-999.99	M	0	U	-999.99	M
161.99	U	-1.12	U	-0.36	U	0	U	-999.99	M	0	U	-999.99	M	-999.99	M	-999.99	M	-53.95	U	-999.99	M	0	U	-999.99	M
168.14	U	-1.34	U	-0.28	U	0	U	-999.99	M	0	U	-999.99	M	-999.99	M	-999.99	M	-53.09	U	-999.99	M	0	U	-999.99	M
167.8	U	-1.08	U	-0.23	U	0	U	-999.99	M	0	U	-999.99	M	-999.99	M	-999.99	M	-45.03	U	-999.99	M	0	U	-999.99	M

Ilustração 2. Modelo de dados do arquivo de saída FLX (CEOP *Flux Dataset Format Definition*) - dados de saída de fluxos

data	hhmm	data	hhmm	sítio	sítio	latitude	longitude	altitude	alt_sensor	fluxo_sen	flag	fluxo_lat	flag	fluxo_CO2	flag	fluxo_solo	flag	
											wt	wq		CO2		solo		
2012/01/02	0	2012/01/02	0	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	-999.99	-7.01	U	25.95	U	6	U	-16.27	U
2012/01/02	0.02083	2012/01/02	0.02083	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	-999.99	-6.93	U	22.94	U	3.22	U	-15.92	U
2012/01/02	0.04167	2012/01/02	0.04167	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	-999.99	3.13	U	17.63	U	6.33	U	-15.67	U
2012/01/02	0.0625	2012/01/02	0.0625	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	-999.99	-0.34	U	23.67	U	7.68	U	-16.24	U
2012/01/02	0.08333	2012/01/02	0.08333	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	-999.99	14.23	U	58.43	U	11.33	U	-16.88	U

Ilustração 3. Modelo de dados do arquivo de saída STM (CEOP *Soil Temperature and Soil Moisture Dataset Format Definition*) - dados de saída de temperatura e umidade do solo

data	hhmm	data	hhmm	sítio	sítio	latitude	longitude	altitude	alt_sensor	T_solo	flag	umid_solo	flag	
										T_solo		U_sok		
2012/01/02	0	2012/01/02	0	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	-999.99	23.88	U	0	U
2012/01/02	0.02083	2012/01/02	0.02083	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	-999.99	23.81	U	0	U
2012/01/02	0.04167	2012/01/02	0.04167	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	-999.99	23.76	U	0	U
2012/01/02	0.0625	2012/01/02	0.0625	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	-999.99	23.71	U	0	U
2012/01/02	0.08333	2012/01/02	0.08333	Sufflux	Cachoeira_Sul	Cachoeira_Sul	-30.2771	-53.1479	40.5	-999.99	23.65	U	0	U

ANEXO B: Tabela dos parâmetros utilizados para o preenchimento das lacunas

Tabela A.1 – Parâmetros utilizados do ano 2010-2011 para o preenchimento das lacunas no ano 2011-2012 para os dados observacionais do sítio de cachoeira do Sul

	período de análise	lacunas	usando (P) ou (E)*	E_0	r_b	a	b
1	10/05/11 – 15/06/11	sim	P	27,6264	0,7460	0,1153	-1,4688
2	16/06/11 – 03/07/11	sim	P	311,3517	0,9496	0,2155	-1,5868
3	04/07/11 – 21/07/11	sim	E				
4	01/08/11 – 31/08/11	não					
5	01/09/11 – 05/10/11	não					
6	06/10/11 – 15/10/11	não					
7	16/10/11 – 07/11/11	sim	E				
8	08/11/11 – 25/11/11	não					
9	26/11/11 – 18/12/11	sim	E				
10	19/12/11 – 29/12/11	não					
11	30/12/11 – 17/01/12	sim	P	-70,3630	5,9025	-0,2284	-44,9952
12	18/01/12 – 07/02/12	sim	P	53,4871	4,3076	-0,1367	-49,4400
13	08/02/12 – 18/02/12	não					
14	19/02/12 – 28/02/12	não					
15	29/02/12 – 17/03/12	não					

* Usando os parâmetros (P) ou as equações empíricas (E) para o preenchimento das lacunas.