

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

MAPEAMENTO DA ÁREA CULTIVADA E ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE
GRÃOS DE ARROZ IRRIGADO A PARTIR DE MODELOS
AGROMETEOROLÓGICOS-ESPECTRAIS PARA O RIO GRANDE DO SUL

Eliana Veleda Klering
Bacharel em Meteorologia/UFPEL
Mestre em Sensoriamento Remoto/UFRGS

Tese apresentada como um dos
requisitos à obtenção do Grau de
Doutor em Fitotecnia
Ênfase Agrometeorologia

Porto Alegre, RS, BRASIL
Julho de 2012

CIP - Catalogação na Publicação

Klering, Eliana Veleda

Mapeamento da área cultivada e estimativa do rendimento de grãos de arroz irrigado a partir de modelos agrometeorológicos-espectrais para o Rio Grande do Sul / Eliana Veleda Klering. -- 2012. 163 f.

Orientador: Denise Cybis Fontana.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS, 2012.

1. Agrometeorologia. 2. Sensoriamento Remoto. I. Fontana, Denise Cybis, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

ELIANA VELEDA KLERING
Bacharel em Meteorologia - UFPel
Mestre em Sensoriamento Remoto - UFRGS


TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM FITOTECNIA

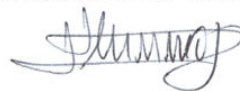
Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

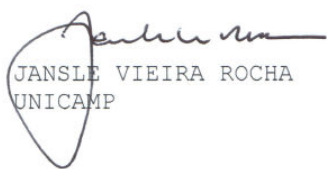
Aprovado em: 06.07.2012
Pela Banca Examinadora


DENISE CYBIS FONTANA
Orientadora - PPG Fitotecnia

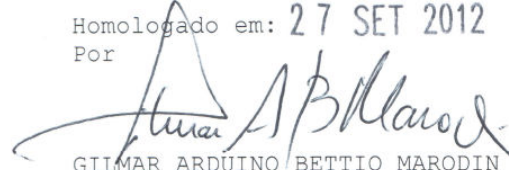

MOACIR ANTONIO BERLATO
PPG Fitotecnia


Prato Rs.
RITA DE CÁSSIA MARQUES ALVES
PPG Sensoriamento Remoto/UFRGS


SILVIO STEINMETZ
EMBRAPA/CPACT - Pelotas/RS


JANSLE VIEIRA ROCHA
UNICAMP

Homologado em: 27 SET 2012
Por


GILMAR ARDUINO BETTIO MARODIN
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia


PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade
de Agronomia

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Silvestre e Tânia, dedico este trabalho e agradeço pelos incentivos e pelo ensinamento de que o conhecimento é o bem mais importante que se pode adquirir na vida. Obrigada, também, pelas inúmeras renúncias que fizeram para apoiar incondicionalmente minha formação acadêmica.

Ao meu irmão Gabriel pelo apoio e convívio durante todo o período de realização deste trabalho.

A Prof^a. Denise Fontana, pela orientação, carinho, dedicação e paciência. Além disso, pelos exemplos de retidão de caráter, conduta profissional e dedicação à família, os quais levarei sempre comigo.

Ao Prof. Moacir Berlato, grande mestre, por seus ensinamentos, por suas palavras de carinho e apoio nos momentos difíceis, pela atenção e, sobretudo, pela amizade.

Ao Prof. Homero Bergamaschi, pela agradável convivência e por suas adoráveis histórias que muitas vezes fizeram minha imaginação voar para outros tempos e lugares.

Aos Professores, Jansle Rocha e Rita Alves, por suas valiosas contribuições e pela participação na comissão orientadora deste trabalho.

Ao Eng. Agrônomo, Cléo Soares, do 17° NATE (Núcleo de Assistência Técnica) do Instituto Rio Grandense do Arroz Irrigado de São Lourenço do Sul, pela colaboração fundamental no trabalho de coleta de pontos de GPS.

Aos amigos queridos, Loana Cardoso e Márcio Araújo, pela maravilhosa convivência, pelos conselhos e palavras de carinho nos momentos difíceis, mas principalmente pelas inúmeras alegrias que compartilhamos. Amigos, vocês fazem parte da minha família do coração.

Aos colegas e amigos, Ana Paula Cordeiro, Astor Nied, Bruno Casamalli e Leosane Bosco, pela convivência e pela força que me motivou na reta final de elaboração deste trabalho.

Aos colegas e amigos, Amanda Junges, Ana Paula Wagner, Eliseu Weber, Vagner Mengue e Viviane Aires de Paula, pelo auxílio na realização de diversas tarefas e pela agradável convivência.

As bolsistas, Daniele Gutterres e Marta Kohmann, pela ajuda em diversas etapas da realização deste trabalho e pelo agradável convívio.

Ao PPG-Fitotecnia da Faculdade de Agronomia /UFRGS pela oportunidade do doutorado e a CAPES pelo auxílio financeiro na realização deste.

E por fim, porém não menos importante agradeço a Deus...

“O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na intensidade com que elas acontecem. Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e PESSOAS INCOMPARÁVEIS”. (Fernando Pessoa)

MAPEAMENTO DA ÁREA CULTIVADA E ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE GRÃOS DE ARROZ IRRIGADO A PARTIR DE MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS-ESPECTRAIS PARA O RIO GRANDE DO SUL ¹

Autor: Eliana Veleda Klering
Orientador: Dr^a. Denise Cybis Fontana

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi caracterizar a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul e testar uma metodologia para definir a área cultivada e para estimar o rendimento de grãos de arroz irrigado através do ajuste de modelos agrometeorológicos-espectrais. O estudo foi realizado para as seis regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. O estudo foi realizado para as seis regiões orizícolas do Estado. Foram utilizados dados de rendimento de grãos de arroz irrigado, área cultivada, dados meteorológicos e imagens de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) do sensor MODIS (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*), de agosto a abril, das safras de 2000/01 até 2009/10. Os resultados mostraram que existem diferenças acentuadas entre as regiões orizícolas do Estado, relacionadas às estatísticas agrícolas da cultura do arroz irrigado. Existe tendência tecnológica de incremento no rendimento de grãos, tanto no Estado como um todo, quanto nas seis regiões orizícolas. A metodologia proposta para determinar a distribuição espacial e quantificar as áreas cultivadas com arroz irrigado é eficiente, e pode ser usada para fornecer dados de entrada em modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos. Os perfis temporais de NDVI/MODIS obtidos são típicos de áreas agrícolas e indicam associação com as principais etapas de desenvolvimento da cultura. Os valores de NDVI são baixos no período de implantação, crescentes durante o desenvolvimento vegetativo, atingindo os valores máximos na floração e início de enchimento de grão, voltando a decrescer durante a maturação fisiológica dos grãos. A radiação solar, temperatura mínima do ar e NDVI estão associadas ao rendimento de grãos de arroz irrigado, em diversos períodos do desenvolvimento da cultura. Os modelos agrometeorológicos-espectrais para estimativa de rendimento de grãos, ajustados através da abordagem orientada pelas relações clima-planta, são adequados às estimativas em nível regional e podem introduzir objetividade ao sistema atual de previsão de safras. No entanto, o modelo elaborado para o Estado como um todo ainda necessita de melhorias.

¹ Tese de Doutorado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (164p.) Julho, 2012.

CROP AREA MAPPING AND CROP RICE YIELDS ESTIMATION USING AGROMETEOROLOGICAL-SPECTRAL MODELS FOR RIO GRANDE DO SUL STATE, BRAZIL¹

Author: Eliana Veleda Klering
Advisor: Dr^a. Denise Cybis Fontana

ABSTRACT

The objective of this study was to characterize the irrigated rice crop at Rio Grande do Sul State and to test a methodology to define the cultivated area and to estimate the grain yield through the adjustment of the agrometeorological-spectral models. The study was developed for the six rice-growing regions of Rio Grande do Sul. Data of the irrigated rice grain yield, crop area, meteorological data and NDVI (Normalized Difference of Vegetation Index) images of MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) sensor, were used from August to April, from 2000/01 to 2009/10 crop season. The results showed that there are accentuated differences between the rice-growing regions of the State related to the agricultural statistics of irrigated rice crop. There are technological increasing tendency of grain yield, at the average State level as well as for the six rice-growing regions. The proposed methodology to determine the spacial distribution and to quantify the irrigated rice crop areas is efficient, and can be used to provide input data on agrometeorological-spectral models to estimate grain yield. The obtained temporal profiles of NDVI/MODIS are typical of crop areas and are associated to the principal stages of culture development. The NDVI values are low in the implantation period, increasing during the vegetative development, reaching the maximum values at the flowering and at the beginning of the grain filling and decreasing during the grain physiological maturation. The solar radiation, minimum air temperature and NDVI are associated to the irrigated rice grain yield, in several crop development periods. The agrometeorological-spectral models to estimate irrigated rice grain yield, adjusted through at the orientated approach by the climate-plant relationships, are adequate to the estimates in regional levels and can introduce objectivity to the current harvests forecasts. However, the elaborated model for the Rio Grande do Sul as a whole still needs improvements.

¹ Doctoral thesis in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (164p.) July, 2012.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Estimativas de safras.....	5
2.2 Área Cultivada	7
2.2.1 Estimativas oficiais para a cultura do arroz irrigado.....	7
2.2.2 Estimativas através de sensoriamento remoto	12
2.2.2.1 Aspectos gerais.....	12
2.2.2.2 Comportamento espectral da vegetação, solo e da água	13
2.2.2.3 Resposta espectral da cultura do arroz irrigado.....	16
2.2.2.4 Estimativas utilizando o atributo espectral	18
2.2.2.5 Estimativas utilizando o atributo temporal.....	20
2.2.2.6 Sensor MODIS.....	23
2.2.2.7 Máscaras de cultivo.....	26
2.3 Rendimento de grãos	28
2.3.1 Aspectos gerais da cultura do arroz irrigado.....	28
2.3.1.1 Ciclo fenológico.....	28
2.3.1.2 Exigências bioclimáticas	29
2.3.1.3 Efeitos associados ao fenômeno El Niño Oscilação Sul na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul	34
2.3.1.4 Zoneamento agrícola	37
2.3.1.5 Regiões de cultivo no Rio Grande do Sul.....	38
2.3.1.6 Dados oficiais de rendimento de grãos	39
2.3.2 Modelagem de rendimento de grãos de arroz irrigado	41
2.3.2.1 Aspectos gerais relacionados à modelagem.....	41
2.3.2.2 Modelos agrometeorológicos-espectrais para estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado.....	43

3 MATERIAL E MÉTODOS.....	48
3.1 Área de estudo	48
3.2 Período de estudo	50
3.3 Dados	50
3.3.1 Estatísticas agrícolas	50
3.3.2 Rendimento de grãos.....	50
3.3.3 Dados meteorológicos	50
3.3.4 Imagens de satélite.....	53
3.4 Análises	54
3.4.1 Estatísticas agrícolas	54
3.4.2 Estimativa de área cultivada com arroz irrigado a partir de imagens MODIS	55
3.4.2.1 Determinação das máscaras de cultivo.....	55
3.4.2.2 Análise do mapeamento.....	59
3.4.3 Rendimento de grãos de arroz irrigado.....	61
3.4.3.1 Perfis temporais de NDVI/MODIS	61
3.4.3.2 Correlações.....	63
3.4.3.3 Ajuste dos modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado.....	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1 Estatísticas agrícolas.....	67
4.1.1 Área cultivada	67
4.1.2 Produção	72
4.1.3 Rendimento de grãos de arroz irrigado.....	75
4.2 Estimativa da área cultivada com arroz irrigado a partir de imagens MODIS	82
4.2.1 Quantificação e espacialização das áreas cultivadas com arroz irrigado	82
4.2.2 Área potencial de cultivo do arroz irrigado.....	90
4.2.3 Avaliação do mapeamento	91
4.3 Rendimento de grãos de arroz irrigado	95
4.3.1 Perfis temporais de NDVI/MODIS.....	95

	Página
4.3.1.1 Média e variabilidade dos perfis temporais de NDVI/MODIS	96
4.3.1.2 Variabilidade dos perfis temporais de NDVI associada ao fenômeno ENOS	101
4.3.1.3 Tendência temporal do NDVI	104
4.3.2 Correlações.....	110
4.3.2.1 Variáveis espectrais e o rendimento de grãos de arroz irrigado	110
4.3.2.2 Variáveis meteorológicas e o rendimento de grãos de arroz irrigado	113
4.3.3 Modelos de estimativa de rendimento de grãos de arroz	118
4.3.3.1 Ajuste dos modelos.....	118
4.3.3.2 Teste	128
5 CONCLUSÕES	131
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
7 APÊNDICES	147

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Características do sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Acqua. Fonte dos dados: Adaptado de Soares <i>et al.</i> , (2007).....	24
2. Regiões orizícolas, estações meteorológicas, coordenadas geográficas e Instituição.	51
3. Coeficientes da equação de Ångstrom (β_0 e β_1), utilizados para as estações meteorológicas em estudo. Fonte: Fontana & Oliveira, (1996).....	53
4. Ocorrência de eventos ENOS (El Niño Oscilação Sul). Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte: NOAA, (2012).	62
5. Período de dezesseis dias considerado para o agrupamento dos dados meteorológicos.	64
6. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação da área semeada com grãos de arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas e no Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2010).	69
7. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação da área colhida com grãos de arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas e no Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados IBGE/LSPA (2012).	71
8. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação da produção de grãos de arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas e no Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).	75
9. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação do rendimento de grãos de arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas e no Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).	76
10. Área média cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul estimada através de imagens NDVI/MODIS, dados oficiais (IBGE) e desvios médios (%). Período 2000/01 a 2009/10.....	84

11. Área estimada através de imagens MODIS (mil ha); Diferença percentual com relação à referência (*Landsat*); Erro de Omissão (%); Erro de Inclusão (%); Erro Geral (%), Exatidão Geral (E_g) (%); Índice *Kappa* (K). 92
12. Coeficientes de correlação de Pearson entre os valores de NDVI de dezesseis dias e os rendimentos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2009/01 até 2000/10. 110
13. Coeficientes de correlação de Pearson entre os valores de NDVI – mensais e integração do período de crescimento - e os rendimentos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10. 111
14. Coeficientes de correlação de Pearson entre a radiação solar global de dezesseis dias e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10. 114
15. Coeficientes de correlação de Pearson entre a radiação solar global mensal e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10. 114
16. Coeficientes de correlação entre o número de dias com temperatura mínima do ar menor ou igual 15°C ($ND\ T_{min}\leq 15^{\circ}\text{C}$) de dezesseis dias e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10. 116
17. Coeficientes de correlação entre o número de dias com temperatura mínima do ar menor ou igual 15°C mensais ($ND\ T_{min}\leq 15^{\circ}\text{C}$) e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10. 116
18. Coeficientes de correlação de Pearson entre a temperatura mínima absoluta do ar (T_{minabs}) de dezesseis dias e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10. 117

19. Coeficientes de correlação de Pearson entre a temperatura mínima absoluta do ar (Tminabs) mensal e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10. 117
20. Modelos para estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustados através de regressão linear múltipla, para as regiões orizícolas e para o Estado do Rio Grande do Sul, a partir de dados agrometeorológicos e espectrais. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. 119
21. Modelos orientados para estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustados através de regressão linear múltipla, para as regiões orizícolas e para o Estado do Rio Grande do Sul, a partir de dados agrometeorológicos e espectrais. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. 122

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Produção média de grãos de arroz nos principais países produtores. Período: 2000 a 2010. Fonte dos dados: FAOSTAT, (2012).	8
2. Área média cultivada de arroz nos principais países produtores. Período: 2000 a 2010. Fonte dos dados: FAOSTAT, (2012).	9
3. Produção de arroz nas regiões brasileiras. Período: 2000 a 2010. Fonte dos dados: FAOSTAT, (2012).	10
4. Produção (milhões t) (a) e área cultivada com arroz irrigado (mil ha) (b) no Rio Grande do Sul (RS) e no Brasil. Período: safras agrícolas 1989/1990 até 2011/2012. Fonte dos dados: IBGE/LSPA, (2012); CONAB, (2012b). * Estimativa de produção divulgada pela CONAB, (2012b).	11
5. Curvas típicas de reflectância espectral para vegetação, solo e água. Fonte: Adaptado de Richards (1993).	14
6. Ciclo fenológico da cultura do arroz com a fase vegetativa que corresponde ao período do aparecimento da primeira folha (V1) até a última folha (VF) e a fase reprodutiva a partir do início do desenvolvimento da panícula (R0) até a maturação das panículas (R9). adaptada de EMBRAPA (2011).	29
7. Zoneamento Agroclimático por época de semeadura para o arroz irrigado, cultivares de ciclos tardios (T), médios (M), precoces (P) e muito precoces (MP) no Estado do Rio Grande do Sul. Os números e as letras indicam as regiões e sub-regiões agroecológicas. Fonte: Adaptado de Steinmetz <i>et al.</i> , (2007).	38
8. Rendimento médio de grãos de arroz nos principais países produtores. Período: 2000 a 2010. Fonte dos dados: FAOSTAT, (2012).	40
9. Rendimento de grãos de arroz irrigado (t ha ⁻¹) no Brasil e no Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas 1989/90 até 2011/12. Fonte dos dados: IBGE/LSPA, (2012); CONAB, (2012b). * Estimativa de produção divulgada pela CONAB, (2012b).	41
10. Regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul e estações meteorológicas utilizadas. Fonte de dados: IRGA e 8°DISME/INMET.	49

11. Esquema de obtenção da imagem composição colorida (RGB) utilizando o atributo multitemporal das imagens MODIS.....	57
12. Calendário agrícola médio do arroz irrigado, safras 2000/01 a 2004/05, para o Estado do Rio Grande do Sul. Fonte dos dados: EMATER/RS.	58
13. Área semeada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul (a) e (b) nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul (ha). Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010). * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste <i>t-Student</i>	68
14. Área colhida de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (a), nas diferentes regiões orizícolas (b) e; diferença entre área semeada e área colhida (c). Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2010).* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste <i>t-Student</i>	70
15. Produção de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (a); Contribuição percentual média relacionada à produção de cada região orizícola do Estado (b). Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).* Significativo a 10% de probabilidade pelo teste <i>t-Student</i>	74
16. Tendência temporal do rendimento de arroz irrigado para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012). * Significativo a 10% de probabilidade pelo teste <i>t-Student</i>	78
17. Tendência temporal do rendimento de arroz irrigado para as o Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012). * Significativo a 10% de probabilidade pelo teste <i>t-Student</i>	79
18. Rendimento corrigido (sem tendência temporal) de arroz irrigado para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).	80
19. Rendimento corrigido (sem tendência temporal) de arroz irrigado para as o Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).....	81
20. Relação entre a área cultivada com arroz irrigado nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, estimada através de composições em RGB de NDVI (Área NDVI/MODIS) e a área oficial fornecida pelo IBGE (Área IBGE). Período: 2000/01 a 2009/10. * Significativo a 1% de probabilidade pelo teste <i>t-Student</i>	83
21. Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, na região orizícola do Rio Grande do Sul durante as safras de 2006/07 e 2009/10.....	86

22. Recorte de imagens NDVI/MODIS, de área localizada na região orizícola da Zona Sul, com as lavouras cultivadas com arroz irrigado em destaque, nas safras de 2007/08 e 2009/10.	88
23. Área semeada média de arroz, soja e milho nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).....	90
24. Áreas potenciais de cultivo do arroz irrigado na região orizícola do Rio Grande do Sul.	91
25. Mapa de referência, elaborado através de imagens Landsat, para a safra 2005/06 (a). Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, no Rio Grande do Sul durante a safra de 2005/06 (b). Municípios utilizados para avaliar a qualidade do mapeamento, pertencentes às regiões: (1) Fronteira Oeste: (a) Uruguaiana, (b) Itaqui, (c) Alegrete, (d) São Borja, (e) Barra do Quaraí; (2) Campanha: (a) Dom Pedrito, (b) São Gabriel, (c) Rosário do Sul, (d) Cacequi, (e) Santana do Livramento; (3) Depressão Central: (a) Cachoeira do Sul, (b) São Sepé, (c) Restinga Seca, (d) Rio Pardo, (e) Santa Maria.....	93
26. Perfis temporais médios de NDVI/MODIS, das áreas cultivadas com arroz irrigado, nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: setembro a abril das safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.	97
27. Perfis temporais de NDVI/MODIS (valores mínimos, médios e máximos) das áreas cultivadas com arroz irrigado nas regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.	99
28. Perfis temporais médios de NDVI/MODIS, das áreas cultivadas com arroz irrigado, das safras de ocorrência de La Niña e El Niño nas regiões da Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul.....	102
29. Evolução temporal do NDVI, das áreas cultivadas com arroz irrigado, nas regiões orizícolas da Fronteira Oeste, Campanha e Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.	106
30. Evolução temporal do NDVI do mês de novembro, referente às áreas cultivadas com arroz irrigado, nas regiões orizícolas da Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10, * Coeficiente de inclinação da reta significativo a 10%.....	109

31. Dispersão de valores estimados e observados do rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustados através de diferentes abordagens, para as regiões Fronteira Oeste, Campanha e Depressão Central. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. 125
32. Dispersão de valores estimados e observados do rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustados através de diferentes abordagens, para as regiões Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. 126
33. Dispersão entre os valores estimados e observados do rendimento de grãos de arroz irrigado, elaborados através de diferentes abordagens, para o Estado do Rio Grande do Sul, no período de ajuste. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. 127
34. Dispersão entre os valores estimados e observados do rendimento de grãos de arroz irrigado, elaborados através de diferentes abordagens, para o Estado do Rio Grande do Sul, no período de teste. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste *t-Student*; ** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste *t-Student*. 129

RELAÇÃO DE APÊNDICES

Página

1. Coeficientes de inclinação da reta (β) ajustada às séries temporais de temperatura mínima (Tmin) e radiação solar, para as diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.	147
2. Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, na região orizícola do Rio Grande do Sul durante as safras de 2000/01 (a) e 2001/02 (b).	148
3. Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, na região orizícola do Rio Grande do Sul durante as safras de 2002/03 e 2003/04.	149
4. Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, na região orizícola do Rio Grande do Sul durante as safras de 2004/05 e 2005/06.	150
5. Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, na região orizícola do Rio Grande do Sul durante as safras de 2007/08 e 2008/09.	151
6. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Fronteira Oeste. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.	152
7. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Campanha. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. ...	153
8. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Depressão Central. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.	154
9. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Planície Interna à Lagoa dos Patos. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.	155
10. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Planície Externa à Lagoa dos Patos. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.	156

11. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.....	157
12. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Fronteira Oeste. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.	158
13. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Campanha. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.	159
14. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Depressão Central. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.	160
15. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Planície Interna à Lagoa dos Patos. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.....	161
16. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Planície Externa a Lagoa dos Patos. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.....	162
17. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.	163

1 INTRODUÇÃO

O arroz é um dos cereais de maior relevância, pois cultivado em todos os continentes, é considerado alimento básico diário para metade da população mundial, o que repercute sobremaneira nos aspectos socioeconômicos. A questão ambiental relacionada ao cultivo também é de extrema importância, pois a cultura cobre aproximadamente 10% da terra arável do Planeta e é considerado um dos cultivos agrícolas que mais emite gás metano, contribuindo assim para a intensificação do efeito estufa (Cantrell, 2002; Xiao *et al.*, 2006).

O Brasil destaca-se quanto à produção do grão, sendo o principal produtor fora do continente asiático. Atualmente, o Rio Grande do Sul é considerado estabilizador da safra nacional, tendo sido responsável, na safra 2011/12, por 66,5% da produção brasileira (cerca de 7,3 milhões de toneladas), com área plantada superior a 1,17 milhão de hectares (IBGE, 2012). Estima-se que, anualmente, essa produção corresponda a um valor bruto de 5 bilhões de reais, representando 3% da arrecadação de ICMS (Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços) e 2,27% do PIB (Produto Interno Bruto) do Estado (IRGA, 2012).

Rotineiramente a geração de informações acerca de estimativas de área cultivada, produção e rendimento de grãos de arroz irrigado no Brasil são

realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Nesses levantamentos, são considerados dados obtidos através de entrevistas com produtores e cooperativas agrícolas e, também, informações de financiamentos agrícolas. Em função do caráter subjetivo dos levantamentos oficiais, essas informações não permitem uma análise quantitativa dos erros envolvidos, sendo passíveis de manipulação. Assim, torna-se importante a proposição de métodos objetivos e de fácil implementação que possam ser incorporados, complementando a metodologia adotada nos programas oficiais de previsão de safras.

Uma das alternativas para introduzir objetividade aos métodos oficiais é a utilização de informações oriundas de sensores remotos orbitais. O surgimento das técnicas de mapeamento por satélite propiciou o desenvolvimento de várias pesquisas relacionadas à estimativa de área cultivada. Os resultados de diversos trabalhos desenvolvidos no âmbito acadêmico demonstraram que dados provenientes de sensores orbitais de média resolução espacial permitem a quantificação de áreas de forma precisa, menos subjetiva, mais rápida e levando em conta as diferentes escalas regionais.

No que se refere ao monitoramento e a estimativa de rendimento de culturas, entretanto, são necessários dados que cubram grandes áreas de forma continuada ao longo do ciclo da cultura e que possam ser usados de forma operacional. Em escala regional as imagens do sensor orbital MODIS, embora de moderada resolução espacial, vêm se mostrando interessante para o monitoramento de áreas agrícolas, devido às características de cobertura global diária do planeta, larga faixa de imageamento e disponibilidade de

bandas espectrais próprias para o monitoramento da vegetação (Huete *et al.*, 2002). Entre os produtos oriundos deste sensor, que possibilitam o monitoramento das variações temporais de áreas cultivadas, destaca-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). De modo geral, este índice tem tido importante função no monitoramento de cultivos, pois indica associação entre sua grandeza e as condições de biomassa ao longo do desenvolvimento das culturas.

Neste contexto, a hipótese estabelecida neste estudo é de que através da utilização de dados espectrais, oriundos do sensor orbital MODIS, aliados a dados meteorológicos, é possível gerar estimativas confiáveis de área cultivada e de rendimento de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. Dada a objetividade, a precisão e a facilidade de obtenção dos dados estas estimativas podem ser incorporadas ao sistema nacional de monitoramento e previsão de safras no Rio Grande do Sul e também no Brasil.

Partindo da hipótese formulada, este trabalho teve como objetivo geral caracterizar a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul e testar uma metodologia para definir a área cultivada e estimar o rendimento de grãos através do ajuste de modelos agrometeorológicos-espectrais.

Os objetivos específicos foram:

1. Caracterizar a produção de arroz irrigado através de estatísticas descritivas dos dados oficiais de área cultivada, produção e rendimento de grãos;
2. Verificar a variabilidade anual, interanual e a existência de tendência tecnológica na série de rendimento de grãos nas diferentes regiões produtoras;

3. Obter dados espectrais das áreas cultivadas com arroz irrigado no Estado e caracterizar o perfil temporal típico do NDVI/MODIS das regiões produtoras como subsídio a atividades de monitoramento da evolução temporal da cultura do arroz irrigado;
4. Investigar as relações entre perfis temporais de NDVI/MODIS e a variabilidade climática frente à ocorrência de eventos El Niño Oscilação Sul (ENOS);
5. Testar a existência de tendência temporal nas séries de NDVI/MODIS;
6. Definir as variáveis agrometeorológicas e espectrais melhor correlacionadas com o rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul;
7. Ajustar modelos empíricos para estimar o rendimento de grãos de arroz irrigado, para as diferentes regiões produtoras e para o Estado, a partir de variáveis agrometeorológicas e espectrais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estimativas de safras

Estimativas de safras agrícolas correspondem ao conjunto de estatísticas das variáveis referentes ao setor agropecuário, entre as quais se destacam a área cultivada (ha), produção (t) e, por consequência destas, o rendimento de grãos ($t\ ha^{-1}$) de determinada cultura agrícola (Pino, 1999).

Através das estimativas de safras é possível conhecer a distribuição espacial e monitorar o desenvolvimento das principais culturas agrícolas constituindo-se assim como uma ferramenta imprescindível para o planejamento estratégico do País. Além disso, estas informações são importantes subsídios para a formulação de políticas públicas e para o abastecimento e a segurança alimentar da população (Assad *et al.*, 2007).

No Brasil, as estimativas agrícolas oficiais são elaboradas e divulgadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), subordinado ao Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. No entanto, outras instituições também disponibilizam estatísticas agrícolas como, por exemplo, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que tem por competência gerir as políticas agrícolas e de abastecimento.

Através do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) e da Produção Agrícola Municipal (PAM) o IBGE divulga as estatísticas oficiais das principais culturas agrícolas do País. O LSPA disponibiliza informações mensais a respeito de estimativas mensais de área plantada e colhida, produção, rendimento médio. Já através do PAM são fornecidas informações anuais referentes à área, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção.

Tanto o LSPA como o PAM são elaborados a partir da coleta de dados fundamentada no acompanhamento permanente da evolução da produção, através de levantamentos diretos e, também, de informações complementares. São consideradas as condições meteorológicas vigentes, a incidência de pragas e doenças, dados relacionados a financiamentos e seguros agrícolas, demandas por insumos, comercialização, industrialização e outras informações correlatas (IBGE, 2002).

Embora a coleta de dados referentes às estatísticas agrícolas oficiais esteja baseada em conceitos e protocolos adotados internacionalmente as informações geradas possuem caráter subjetivo. Além de provirem de um método extremamente trabalhoso e oneroso, não permitem uma análise quantitativa dos erros envolvidos no processo e não detectam pequenas variações ao longo do tempo (Rizzi & Rudorff, 2005; Figueiredo, 2007).

Com o objetivo buscar ferramentas diversificadas para complementar o método de previsão de safras tradicional (método subjetivo), a CONAB vem utilizando, desde 2004, recursos tecnológicos de eficiência comprovada, como modelos estatísticos auxiliados pelo sensoriamento remoto, posicionamento por satélite (GPS), sistemas de informações geográficas e modelos

agrometeorológicos. Tais tecnologias compõem o método objetivo, de previsão de safras, que recebeu o nome de Projeto GeoSafras (CONAB, 2010).

Segundo Bazzgeer *et al.* (2006), as imagens de satélite têm surgido como uma importante e promissora fonte de dados para estimativas de área cultivada e rendimento de grãos, em função de gerarem informações objetivas a respeito das culturas agrícolas, com adequada caracterização espacial e temporal.

A utilização de imagens de satélite para a determinação e quantificação das áreas agrícolas assim como para estimativas de rendimento de culturas vem sendo demonstrada em inúmeros trabalhos desenvolvidos em ambiente experimental e acadêmico. São pesquisas aplicadas em áreas piloto de alcance local cobrindo, na maioria das vezes, regiões de pequenas extensões, mas que demonstram ser possível a utilização de imagens de satélite em maior escala (Figueiredo, 2007).

Os dados espectrais, provenientes de sensores remotos, se constituem como uma importante ferramenta para o monitoramento e a estimativa de rendimento de culturas agrícolas, por permitirem a quantificação das relações entre parâmetros agronômicos e as propriedades espectrais da cultura (Holben *et al.*, 1983; Patel *et al.*, 1985).

2.2 Área Cultivada

2.2.1 Estimativas oficiais para a cultura do arroz irrigado

Cultivado e consumido em todos os continentes, o arroz destaca-se pela área de cultivo e produção, desempenhando papel estratégico tanto no aspecto econômico quanto social. Cerca de 151 milhões de hectares são cultivados

anualmente no mundo produzindo 634 milhões de toneladas, embora apenas 18% da área total seja cultivada sob irrigação mais de 75% do total produzido é oriundo deste sistema de cultivo (IRRI, 2012).

Aproximadamente 90% do arroz mundial é produzido e consumido na Ásia. Mais de 70% da população asiática, ou seja, aproximadamente 2,7 bilhões de pessoas, dependem da produção sustentável de arroz oriunda somente do sistema irrigado para o seu suprimento alimentar (FAOSTAT, 2012). Segundo dados do Instituto Internacional de Pesquisa do Arroz (IRRI), neste continente, o arroz é cultivado em mais de 200 milhões de propriedades rurais, sendo que a maioria delas têm tamanho inferior a 1 hectare. Entre os países maiores produtores destacam-se China e Índia, com produção e área cultivada muito superiores aos demais (Figuras 1 e 2).

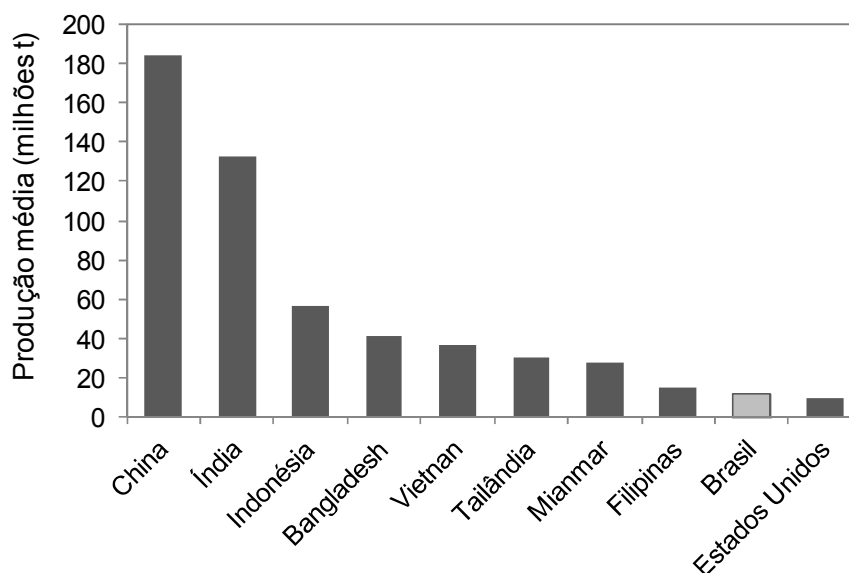


FIGURA 1. Produção média de grãos de arroz nos principais países produtores. Período: 2000 a 2010. Fonte dos dados: FAOSTAT, (2012).

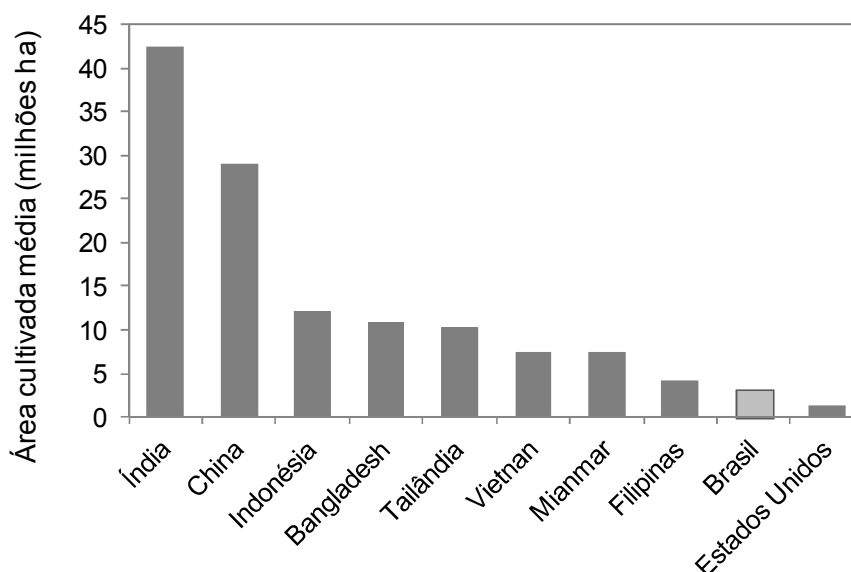


FIGURA 2. Área média cultivada de arroz nos principais países produtores. Período: 2000 a 2010. Fonte dos dados: FAOSTAT, (2012).

O Brasil é o maior produtor de arroz fora do continente asiático, sendo que em média (2000 a 2010), a produção brasileira é de 11,6 milhões de toneladas (Figura 1), ocupando uma área de aproximadamente 3,1 milhões de hectares (Figura 2).

Em função de sua ampla variabilidade genética o arroz é cultivado em todas as regiões brasileiras (Figura 3) e entre os cereais cultivados no verão destaca-se como uma das culturas agrícolas mais importantes (D'arco, 2007). Segundo dados do IBGE, na safra de 2010/11 a produção foi de 13,4 milhões de toneladas o que representou cerca de 2% da produção mundial.

A região Sul destaca-se no cenário nacional por produzir, em média, 75% do total do País. De acordo com o Acompanhamento da Safra de Grãos 2011/2012 elaborado pela CONAB (CONAB, 2012b), a produção de arroz irrigado na região Sul foi de 8,7 milhões de toneladas e a área cultivada foi superior a 1,2 milhão de hectares.

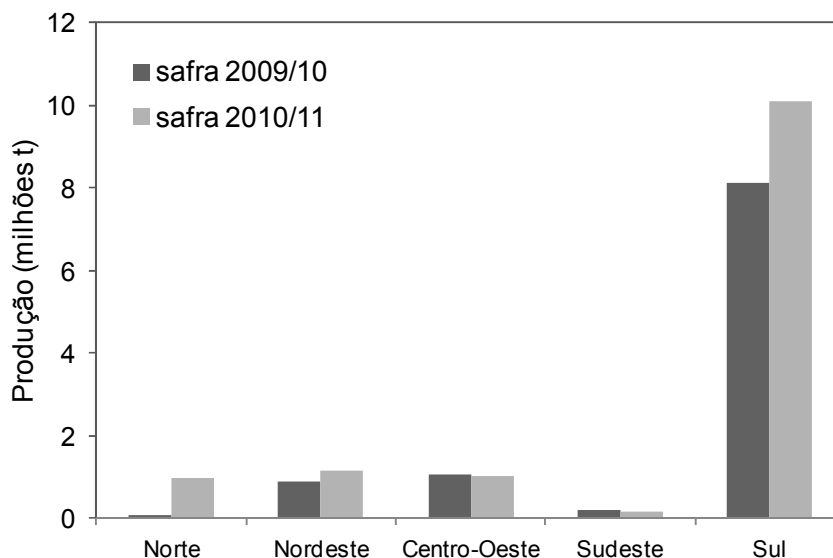


FIGURA 3. Produção de arroz nas regiões brasileiras. Período: 2000 a 2010. Fonte dos dados: FAOSTAT, (2012).

No Estado do Rio Grande do Sul o cultivo do arroz irrigado apresenta grande importância econômica, contribuindo com cerca de 30% da safra gaúcha de grãos (IBGE, 2012). Do ponto de vista social, a atividade orizícola no Estado envolve anualmente um contingente expressivo de recursos humanos, totalizando aproximadamente 232 mil empregos em toda a cadeia produtiva (Ludwig, 2004; IRGA, 2006). Segundo o último levantamento efetuado pelo IRGA, divulgado em 2006, 18,5 mil pessoas participaram diretamente da produção da safra 2004/05, sendo 11,9 mil produtores e 6,6 mil parceiros ou proprietários de terra. O setor agroindustrial opera, atualmente, com 350 indústrias de beneficiamento e responde por quase 50% do beneficiamento do arroz no País. O tamanho médio das lavouras é de 144,7 ha, com cerca de 60% da área cultivada em terras arrendadas (SOSBAI, 2010).

Nas últimas 23 safras agrícolas (1989/90 até 2011/12) a quantidade de arroz produzida no Estado tem contribuído com cerca de 50% da produção brasileira do grão (Figura 4a).

Ao longo das safras, a área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul tem mostrado uma leve tendência constante de crescimento, fato este que difere quando se observa os dados referentes ao País (Figura 4b). A área cultivada no Estado depende fortemente das condições climáticas (água disponível para irrigação) e de questões relacionadas às condições de mercado (D'arco, 2007).

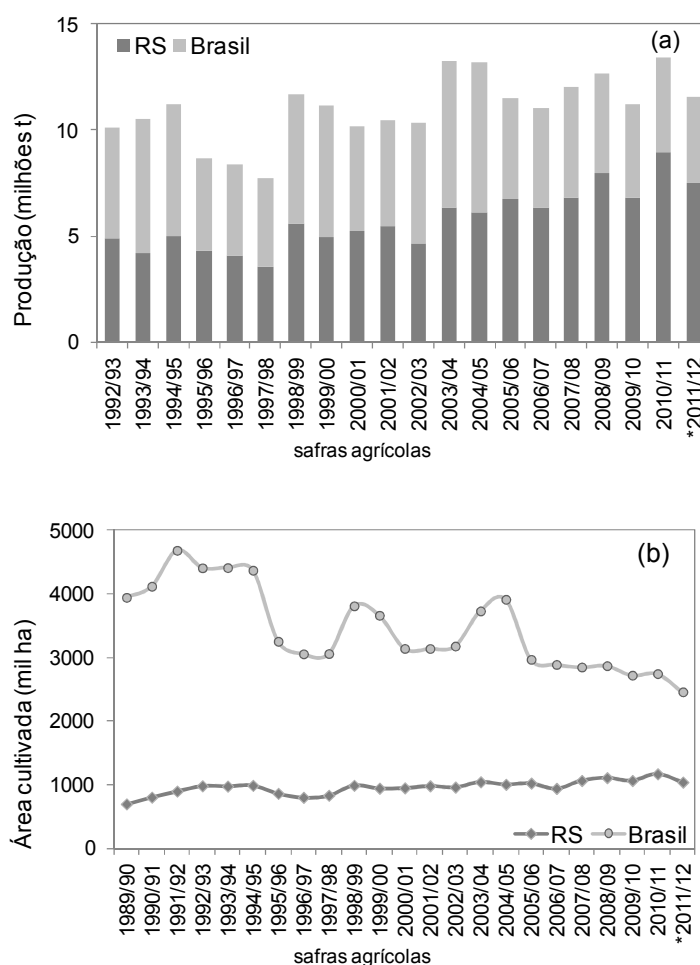


FIGURA 4. Produção (milhões t) (a) e área cultivada com arroz irrigado (mil ha) (b) no Rio Grande do Sul (RS) e no Brasil. Período: safras agrícolas 1989/1990 até 2011/2012. Fonte dos dados: IBGE/LSPA, (2012); CONAB, (2012b). * Estimativa de produção divulgada pela CONAB, (2012b).

2.2.2 Estimativas através de sensoriamento remoto

2.2.2.1 Aspectos gerais

A grande extensão territorial brasileira, aliada à dinâmica espaço-temporal da atividade agrícola, torna difícil a obtenção de informações atualizadas e confiáveis sobre este setor da economia (Rizzi & Rudorff, 2005). Dentro deste contexto, as informações coletadas por sensoriamento remoto podem auxiliar na obtenção de dados de forma mais rápida, precisa e com menor custo, quando comparadas àquelas geradas por técnicas tradicionalmente empregadas em estimativas de safras (Pino, 2001). Entretanto, a utilização de imagens orbitais para a identificação e avaliação de áreas ocupadas com culturas em pequenas lavouras apresenta limitações, devido a características relacionadas à construção de grande parte dos sistemas sensores.

Conceitualmente sensoriamento remoto é definido como a ciência que estuda propriedades físicas e químicas dos alvos, sem ter contato físico com os mesmos, baseando-se somente na interação desses com a radiação eletromagnética (Novo, 1989; Lillesand & Kiefer, 1994). Dentro deste contexto, um sensor remoto é um sistema capaz de detectar, medir e registrar a radiação eletromagnética (REM) emitida ou refletida pela superfície terrestre.

Cada objeto, devido a suas características físico-químicas, apresenta um comportamento diferente frente à relação entre a radiação que nele incide e a radiação por ele refletida, transmitida e absorvida, denominado de comportamento espectral (Novo, 1989). Além das propriedades físico-químicas, outras características inerentes aos alvos imageados interferem em seu comportamento espectral (Ponzoni, 2001). O conhecimento das interações da

REM com os diferentes alvos é fundamental para a utilização de dados espectrais coletados por sensores a bordo de plataformas orbitais.

Do ponto de vista do sensoriamento remoto, o monitoramento de uma cultura agrícola corresponde à evolução temporal do comportamento espectral da mesma. Segundo Epiphanyo (1988), um ciclo agrícola completo corresponde a uma sequência de etapas: solo exposto, acúmulo de clorofila e aumento da cobertura verde sobre o solo, queda da quantidade de clorofila, solo exposto novamente.

Para determinar e monitorar áreas cultivadas com arroz irrigado, através de sensoriamento remoto, é de grande importância de se tenha conhecimento dos principais aspectos relacionados ao comportamento espectral da vegetação, do solo e da água.

2.2.2.2 Comportamento espectral da vegetação, solo e da água

A diferenciação dos principais alvos naturais (vegetação, solo e água) a partir de sensores remotos é possível no intervalo do espectro magnético compreendido entre 0,4 e 2,6 μm , pois neste intervalo esses alvos são caracterizados por comportamentos específicos de reflexão, absorção e transmissão.

Na Figura 5 são apresentadas as curvas de reflectância típicas da vegetação, solo e água nas regiões do visível (VIS), do infravermelho próximo (IVP) e do infravermelho médio (IVM) do espectro eletromagnético.

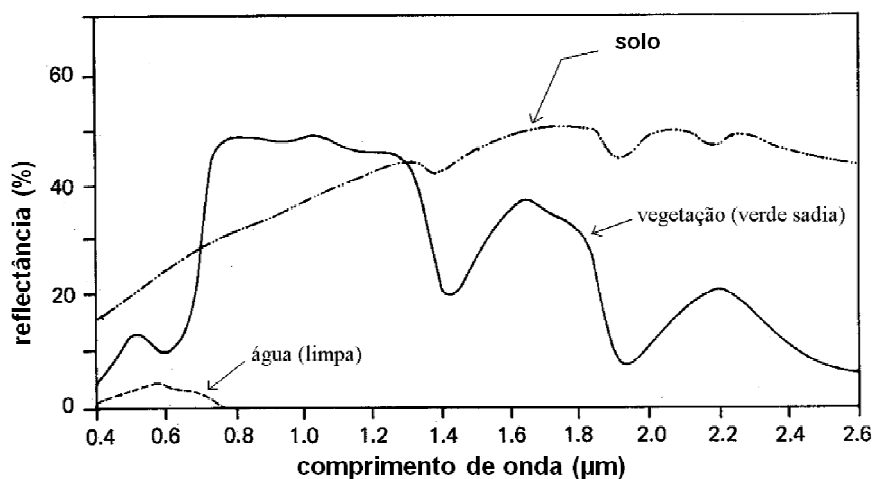


FIGURA 5. Curvas típicas de reflectância espectral para vegetação, solo e água. Fonte: Adaptado de Richards (1993).

A interação da radiação solar com a vegetação ocorre principalmente nas folhas (Colwell, 1974), onde acontece o processo da fotossíntese. Na porção VIS do espectro eletromagnético (0,4 a 0,7 μm) o comportamento da reflexão é determinado pelos pigmentos fotossintetizantes (clorofilas a e b, carotenos e xantofilas), as principais bandas de absorção ocorrem nos comprimento de onda do azul (0,43 - 0,45 μm) e do vermelho (0,65 - 0,66 μm) (Jensen, 2009). Entre as bandas de absorção mencionadas, ocorre uma elevação na quantidade da radiação refletida, gerando um pico de reflectância em aproximadamente 0,53 μm, correspondente à região do verde. A reduzida absorção relativa da vegetação nesta região do visível é responsável pela cor verde da vegetação sadia (Novo *et al.*, 1989).

Na faixa do espectro correspondente ao IVP (0,7 até 1,3 μm) a reflectância aumenta consideravelmente quando comparada à região do visível. Isto resulta do forte contraste entre os índices de refração do conteúdo celular e do espaço intercelular que provoca reflexões e refrações da REM no interior da folha (Knipling, 1970). Nesta faixa de comprimento de ondas, a

associação entre densidade de biomassa e reflectância é diretamente proporcional, ou seja, à medida que aumenta a cobertura vegetal existe uma tendência de incremento na reflectância.

Entre 1,3 e 2,6 μm (infravermelho médio), a reflectância diminui em função das bandas de absorção da água, por volta dos comprimentos de onda 1,4; 1,9 e 2,6 μm (Lillesand & Kiefer, 1999).

A reflectância espectral do solo é influenciada por diversos fatores, entre eles, a umidade, a granulometria, a estrutura, o teor de matéria orgânica, o material de origem e o teor de ferro (Fiorio, 2002; Demattê *et al.*, 2004).

Segundo Epiphanyo *et al.* (1992), a variação de quantidade de água no solo é melhor observada nos comprimentos de ondas de 1,45 e 1,95 μm . Destes, em 1,95 μm é considerado o mais propício para relacionar medidas de reflectância com conteúdo de umidade presente nos solos.

Quanto à granulometria, o aumento da concentração de minerais félsicos (textura de granulação muito fina) e a conseqüente diminuição do tamanho das partículas incrementa a reflectância atenuando as bandas de absorção (Figueiredo, 2005). Na região do VIS a diminuição do tamanho das partículas ocasiona aumento da reflectância, em função do maior espalhamento e menor extinção da luz que passa pelos espaços porosos (Formaggio, 1989).

A reflectância diminui à medida que aumenta o conteúdo de matéria orgânica, principalmente na faixa do espectro que vai de 0,4 a 2,5 μm (Epiphanyo *et al.*, 1992). Quando este conteúdo excede 2%, passa a mascarar as outras propriedades espectrais dos constituintes dos solos. Segundo Formaggio (1989), é possível discriminar melhor o nível de matéria orgânica no

VIS e no IVP até 1,2 μm . A presença de restos de vegetação seca altera a reflectância dos solos tanto no VIS e IVP, quanto no IVM (Nagler *et al.*, 2000).

A quantidade e o tipo de óxidos de ferro presentes no solo são responsáveis por variações significativas da resposta espectral do mesmo. Estes fatores afetam a cor dos solos que, conseqüentemente, acarreta numa diminuição ou aumento da reflectância. Na região de 0,5 a 0,64 μm a reflectância é inversamente proporcional ao teor de óxido de ferro presente no solo (Formaggio, 1983; Epiphanyo *et al.*, 1992).

Diferentemente dos alvos anteriores, a curva espectral da água caracteriza-se por baixos valores de reflectância, menores que 10%, concentrados numa faixa de radiação entre 0,35 e 0,70 μm . Os valores são influenciados principalmente pelo tipo de material em suspensão e, pela concentração de clorofila e pela ondulação da superfície (Lillesand & Kieffer, 1999).

2.2.2.3 Resposta espectral da cultura do arroz irrigado

Nos estágios iniciais a resposta espectral da cultura do arroz irrigado é afetada de maneira significativa pela lâmina de água proveniente do sistema de irrigação por inundação. Além disso, por ser uma lâmina relativamente fina de água, os sedimentos em suspensão e o solo têm uma influência importante na resposta espectral (Patel *et al.*, 1985; Casanova *et al.*, 1998). Segundo Chang *et al.* (2005), nos estágios iniciais, os valores das reflectâncias nas regiões do VIS são ligeiramente inferiores aos do IVP.

Após os estágios iniciais de desenvolvimento, quando a cultura cobre totalmente a lamina d'água, a resposta espectral está associada diretamente as variações na biomassa e no vigor do dossel (Xiao *et al.*, 2006).

De acordo com Casanova *et al.* (1998), a reflectância das lavouras de arroz irrigado, varia no IVP de acordo com a biomassa, aumentando de 15% no estágio inicial do perfilhamento para 50% no estágio do espigamento. A partir maturação os valores voltam a diminuir, apresentando um valor final de aproximadamente 33%. Os valores de reflectância na região do VIS, segundo os mesmos autores, é inversamente proporcional ao vigor da cultura. Ela diminui de 10% no início da emergência a 2% até o estágio do florescimento e depois aumenta para em torno de 17% até a maturação devido à perda da coloração verde pelas folhas.

As correlações existentes entre as medidas espectrais e as variáveis do dossel da cultura do arroz irrigado são mostradas em diversos estudos (Patel *et al.*, 1985, Shibayama & Akiyamaa, 1991; Kimura *et al.*, 2004). Dentro deste contexto, várias pesquisas utilizando diferentes índices de vegetação (IVs) para quantificar a área cultivada com arroz irrigado e monitorar as condições de desenvolvimento da cultura têm sido realizadas em diferentes regiões do planeta, embora os estudos mais relevantes tenham sido desenvolvidos no sul e sudeste asiático (Huang *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2011).

Os IVs resultam de combinações de valores de reflectância em dois ou mais intervalos de comprimento de onda. Estes índices servem como indicadores do crescimento e do vigor da vegetação verde e podem ser utilizados para determinar alguns parâmetros biofísicos, tais como Índice de

Área Foliar (IAF), biomassa, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética, podendo mostrar uma boa relação com o rendimento da cultura (D'arco, 2007; Ponzoni, 2001).

2.2.2.4 Estimativas utilizando o atributo espectral

As estimativas de área cultivada, utilizando o atributo espectral, estão relacionadas ao fato de que a resposta espectral da cultura de interesse apresenta um comportamento diferenciado e específico durante um determinado período (Rudorff *et al.*, 2007). Período este, normalmente associado a um estágio fenológico ou de desenvolvimento da cultura.

Grande parte dos trabalhos que utilizam o atributo espectral, para determinar as áreas agrícolas, são elaborados através de classificação digital e interpretação visual de imagens de satélite.

Através do processo de classificação digital de imagens é possível identificar e quantificar as áreas agrícolas, localizando-as espacialmente, o que pode facilitar uma eventual aferição no campo (Chuvieco, 1996; Rizzi, 2005).

Existem duas abordagens neste processo, denominadas classificação supervisionada e classificação não-supervisionada. O processo de classificação supervisionada se baseia na disponibilidade prévia de amostras representativas, identificadas na imagem, para cada classe de interesse (Mather, 1999). O algoritmo classificador utiliza a informação estatística referente a essas amostras na classificação dos demais pixels da imagem. Na abordagem não-supervisionada o algoritmo associa cada pixel da imagem uma classe espectral, com base nas propriedades intrínsecas do conjunto de dados (Dutra *et al.*, 1981).

O processo de extração de informações a respeito de dados da superfície terrestre pelo intérprete, com base em suas respostas espectrais é chamado de classificação visual de imagens. Este procedimento, também denominado de interpretação visual, consiste no preparo e análise do material, e, também no estabelecimento do método de interpretação (Moreira, 2000).

Na interpretação visual o interprete consegue observar de forma integrada os aspectos relacionados às características espectrais, texturais e principalmente espaciais da imagem, que não são considerados pelo algoritmo classificador (Rizzi, 2005). Entretanto, além da interpretação visual das imagens ser um processo extremamente tedioso e demorado, introduz subjetividade ao mapeamento da cultura, portanto deve ser utilizada de forma restrita. Primeiramente, deve-se buscar e explorar outras alternativas de classificação digital (Rudorff *et al.*, 2007).

Neste contexto, Alvarenga *et al.* (2005) testaram diferentes processos de classificação digital de imagens *Landsat* para determinar as áreas cultivadas com arroz irrigado no município de Santa Vitória do Palmar-RS. Os melhores resultados foram obtidos utilizando-se classificação digital não-supervisionada, através do algoritmo *Isoseg*, de uma imagem referente ao período de máximo desenvolvimento vegetativo (mês de março).

Weber *et al.* (2007) utilizaram a abordagem espectral, através de classificação visual, para determinar áreas cultivadas com arroz irrigado no Rio Grande do Sul no âmbito do projeto GeoSafras . A interpretação visual foi baseada em rigorosos critérios relacionados ao comportamento espectral, a forma, textura, posição no relevo, presença de água, entre outros. Para tanto foram utilizadas imagens *Landsat* referentes a duas datas, uma antes da

implantação das lavouras e outro do período de pleno desenvolvimento da cultura. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, embora tenha sido observada tendência de subestimadas das áreas cultivadas em relação às oficiais.

D'arco (2007) utilizou classificação não-supervisionada, de imagens *Landsat*, para determinar as áreas de arroz irrigado para o Rio Grande do Sul. Os melhores resultados foram obtidos com o emprego de imagens do período de máximo desenvolvimento vegetativo e utilização do algoritmo de classificação *Isoseg*.

Segundo Alvarenga *et al.* (2005), as estimativas de áreas cultivadas, através da utilização do atributo espectral, devem ser elaboradas somente quando as respostas espectrais das culturas forem bem conhecidas e distintas nos seus diferentes estádios fenológicos. Também, deve-se considerar que a cultura agrícola, cujas áreas serão estimadas, seja o cultivo agrícola predominante na região de estudo.

Inúmeros estudos, que utilizam o atributo temporal, para estimar áreas cultivadas utilizam imagens *Landsat*. Entretanto, convêm salientar que, a baixa frequência de aquisição destas imagens associada à ocorrência de cobertura de nuvens, é um fator limitante para a utilização do sensoriamento remoto como ferramenta de suporte as estatísticas agrícola.

2.2.2.5 Estimativas utilizando o atributo temporal

Em regiões caracterizadas pelo cultivo de diferentes espécies agrícolas ou quando o plantio das culturas é distribuído ao longo de um período pré-determinado, deve ser levado em consideração o aspecto multitemporal das

imagens de sensoriamento remoto, pelo fato das diferentes culturas apresentarem respostas espectrais características em função do estágio fenológico (Barros *et al.*, 2001). As análises multitemporais auxiliam no reconhecimento de padrões, minimizando o problema da variabilidade temporal, o que favorece a identificação do comportamento temporal típico das áreas agrícolas (Crusco, 2007).

Segundo Pax-Lenney & Woodcock (1997), as imagens multitemporais são necessárias para monitorar áreas agrícolas devido ao caráter dinâmico da vegetação, mas a escolha do número de imagens necessárias, do período dentro do calendário agrícola e do intervalo entre as datas de aquisição das imagens pode afetar os resultados.

O mapeamento de áreas agrícolas é caracterizado pelas dinâmicas do uso do solo, como o preparo, cultivo e colheita (Sommer *et al.*, 1998). Estes ciclos agrícolas podem ocorrer em um breve intervalo de tempo, o que torna a resolução temporal um fator importante, assim como a resolução espacial, já que as diversas culturas podem ocupar áreas com dimensões diversas.

Dentro deste contexto, Sakamoto *et al.* (2005) utilizaram séries temporais de IVs do MODIS para desenvolver um método de avaliação do estágio fenológico da cultura do arroz. Thiruvengadachari & Sakthivadivel (1997) concluíram que os perfis espectro-temporais gerados pelos valores de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) ao longo de oito anos são capazes de não somente monitorar os desenvolvimento fenológico e a variabilidade espacial do arroz, como também avaliar a condição de estresse da cultura.

Segundo Tomita *et al.*, (2000), a partir de perfis de NDVI gerados com imagens *AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)* foi possível o monitorar os seguintes estágios de desenvolvimento em uma área cultivada com arroz irrigado na Tailândia: preparação do solo, desenvolvimento da cultura, maturação e colheita.

Xiao *et al.* (2002) desenvolveram uma técnica para determinar a época de implantação da cultura do arroz irrigado na Província de Jiangsu, China. Os autores utilizaram informações obtidas a partir das bandas do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio do sensor *SPOT VEGETATION*. Foram analisadas composições decendiais de NDVI E NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada), para avaliar a dinâmica temporal e espacial da lamina d'água inicial do dossel da cultura. Os resultados mostraram que as anomalias temporais dos IVs avaliados são uma ferramenta eficiente e de fácil utilização para a determinação da época de implantação da cultura do arroz na região de estudo.

Em geral, imagens com alta resolução temporal têm resolução espacial baixa ou moderada. Isto ocorre em virtude de características físicas relacionadas à construção da maioria dos sistemas sensores (Mather, 1999). Dessa forma, somente certas culturas podem ser determinadas através da utilização do atributo temporal, ou seja, a partir de imagens baixa ou moderada resolução espacial. Devem ser consideradas apenas aquelas que ocupam áreas maiores, sendo cultivadas mecanicamente e, portanto, em talhões cujas dimensões mínimas geralmente superam uma dezena de hectares (Luiz & Epiphanyo, 2001).

2.2.2.6 Sensor MODIS

O sensor MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*) é o principal instrumento a bordo dos satélites Terra e Acqua, lançados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) em 18 de dezembro de 1999 e 4 de maio de 2002, respectivamente. Estes satélites fazem parte do projeto EOS (*Earth Observing System*) formado por diversos países e liderado pela NASA, constituindo uma série de plataformas para monitoramento terrestre em várias áreas de conhecimento, em diferentes escalas (Soares *et al.*, 2007). Atualmente existem outros sete satélites do projeto EOS em órbita, e mais um está previsto para ser lançado em 2013. Juntas, estas plataformas orbitais vão ajudar os pesquisadores a desvendar os processos climáticos e de mudanças ambientais bem como seus impactos.

Segundo Justice *et al.* (2002), o MODIS foi projetado para fornecer uma série de observações globais que abrangem as interações entre três áreas de estudos distintas: atmosfera, oceano e terra. Para satisfazer as necessidades de cada área, o sensor é composto por 36 bandas espectrais (Tabela 1). Estas bandas estão posicionadas a partir do comprimento de onda de 405 até 14.385 nm, com largura variando entre 10 e 500 nm, sendo algumas destas muito importantes para o monitoramento de cultivos agrícolas. As duas primeiras bandas possuem resolução espacial de 250m, as bandas 3 a 7 de 500 m e as demais de 1 km (MODIS, 2003).

Quanto à resolução temporal, o MODIS adquire imagens globais a cada 2 dias e imagens diárias da superfície terrestre localizada em latitudes superiores a 30°, promovendo o imageamento de uma faixa territorial de 2.330 km em cada período orbital (Soares *et al.*, 2007).

TABELA 1. Características do sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Acqua. Fonte dos dados: Adaptado de Soares *et al.*, (2007).

Bandas espectrais	Resolução espectral (nm)	Resolução espacial (m)	Bandas espectrais	Resolução espectral (nm)	Resolução espacial (m)
1	620-670	250	19	915-965	1000
2	841-876		20	3.660-3.840	
3	459-479	500	21	3.929-3.989	
4	545-565		22	3.929-3.989	
5	1.230-1.250		23	4.020-4.080	
6	1.628-1.652		24	4.433-4.498	
7	2.105-2.155		25	4.482-4.549	
8	405-420	1000	26	1.360-1.390	
9	438-448		27	6.535-6.895	
10	483-493		28	7.175-7.475	
11	526-536		29	8.400-8.700	
12	546-556		30	9.580-9.880	
13	662-672		31	10.780-11.280	
14	673-683		32	11.770-12.270	
15	743-753		33	13.185-13.485	
16	862-877		34	13.485-13.785	
17	890-920		35	13.785-14.085	
18	931-941	36	14.085-14.385		

As imagens MODIS são disponibilizadas na forma de produtos prontos, direcionados a 44 aplicações específicas, distribuídos entre: observação das feições atmosféricas (cobertura de nuvens e propriedades associadas); das feições oceânicas (temperatura da superfície do mar e clorofila); das feições terrestres (mudança de cobertura e uso da terra, temperatura da superfície e propriedades da vegetação).

Uma característica importante das imagens MODIS é de que elas são disponibilizadas de forma gratuita mediante cadastro antecipado através do *site* do Sistema de Informações e Dados, do programa EOS (EOSDIS) (http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle).

Além disso, as imagens são disponibilizadas com correções atmosféricas e geométricas previamente realizadas, estando prontamente utilizáveis sem a necessidade de georreferenciamento adicional.

Dentre os produtos MODIS relacionados às feições terrestres, o produto MOD13Q1 é particularmente interessante ao monitoramento da atividade agrícola. Este produto contém composições de imagens de 16 dias sob a forma dos IVs NDVI e EVI (índice de Vegetação Realçado, do inglês *Enhanced Vegetation Index*), além da reflectância de superfície correspondente às bandas do azul, vermelho, IVP e IVM, em uma resolução espacial de 250 m (as bandas do azul e IVM, originalmente obtidas com 500 m de resolução espacial, são reamostradas para 250 m). Para cada ponto da imagem o algoritmo seleciona o pixel de melhor qualidade em relação à geometria de visada e interferência atmosférica dentre todas as passagens do período, que é então utilizado na geração das imagens compostas.

O NDVI é uma relação entre as reflectâncias de superfície (ρ) das bandas do IVP e do vermelho e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo de elevação solar e minimizar os efeitos de atenuação atmosférica em imagens multitemporais. Este índice mais utilizado em diferentes estudos, sobre vegetação, que envolvem o uso dos dados de sensoriamento remoto.

Os valores de NDVI variam de -1 a 1, sendo a vegetação associada aos valores positivos; nuvens, água e neve, que refletem mais intensamente no vermelho, apresentam valores negativos; solos descobertos e rochas, que refletem praticamente na mesma intensidade no vermelho e no IVP, possuem NDVI próximo à zero (Lillesand & Kiefer, 1999). Este índice é obtido através da Equação 1.

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}}{\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}}} \quad (1)$$

Na qual: ρ_{IVP} é a reflectância de superfície na banda do infravermelho próximo e ρ_{V} é a reflectância de superfície na banda vermelho.

O EVI foi desenvolvido para aperfeiçoar a resposta da vegetação, melhorando a sensibilidade às condições de alta biomassa e estrutura do dossel, através da redução da influência do fundo (solo e restos vegetais) e de interferências atmosféricas (Huete *et al.*, 1999). O EVI é calculado através da Equação 2:

$$\text{EVI} = G \frac{(\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}})}{(L + \rho_{\text{IVP}}) + (c_1 \rho_{\text{V}}) - (c_2 \rho_{\text{AZUL}})} \quad (2)$$

Na qual: ρ_{IVP} é a reflectância de superfície na banda do infravermelho próximo, ρ_{V} é a reflectância de superfície na banda do vermelho, ρ_{azul} é a reflectância de superfície na banda do azul, G o fator de ganho do solo ($G=2,5$), L o fator de ajuste para o solo ($L=1$), c_1 o coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no vermelho ($c_1=6,0$) e c_2 o coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no azul ($c_2=7,5$).

2.2.2.7 Máscaras de cultivo

Devido às características de moderada resolução espacial e alta resolução temporal, inúmeros trabalhos tem utilizado os IVs provenientes do sensor MODIS, para determinar as máscaras de cultivo para a cultura do arroz irrigado, ou seja, para estimar as áreas cultivadas com a cultura (Xiao *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2006, D'arco *et al.*, 2007; Motohka *et al.*, 2009; Boschetti *et*

al., 2009, dentre outros). Nos próximos parágrafos serão descritos apenas alguns.

D'arco *et al.* (2007) determinaram as áreas cultivadas com arroz irrigado no Rio Grande do Sul. Os resultados mostraram que as melhores estimativas foram obtidas utilizando-se classificação digital não-supervisionada *Isoseg* de imagens MODIS do período de máximo desenvolvimento vegetativo da cultura.

Klering (2007), também, determinou as áreas cultivadas com arroz irrigado, a partir de imagens MODIS, para o Estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizadas imagens dos períodos de mínimo e máximo desenvolvimento vegetativo para o estabelecimento das máscaras de cultivo. Os resultados mostraram que as áreas estimadas foram, em média, 25% superiores aos dados oficiais de área cultivada.

Motohka *et al.* (2009) avaliaram quais seriam os dados de sensoriamento remoto mais adequados para estimar as áreas cultivadas com arroz irrigado no Japão central. Foram utilizados dados dos IVs do sensor MODIS para os períodos correspondentes as estações da Monções, pois nestes períodos a qualidade dos dados espectrais orbitais é comprometida pela grande quantidade de nuvens. A qualidade dos dados de sensoriamento remoto foi avaliada através de medições radiométricas realizadas *in situ*. O EVI/MODIS foi que apresentou os resultados mais próximos aos observados *in situ*. A contaminação por nuvens nas imagens MODIS chegou a 65%. No entanto, o uso combinado de informações provenientes dos sensores MODIS a bordo das plataformas orbitais *Terra e Aqua* geraram uma diminuição da contaminação para 43%.

Boschetti *et al.* (2009) desenvolveram um estudo para identificar as áreas cultivadas com arroz irrigado no norte da Itália através de imagens MODIS. Foi utilizada uma série temporal de cinco anos, de composições de dezesseis dias de NDVI, com o objetivo de se avaliar o comportamento espectro-temporal da cultura. Os resultados confirmam o potencial do uso de dados de sensoriamento remoto para determinar as máscaras de cultivo e o monitorar os estádio fenológico da cultura do arroz.

2.3 Rendimento de grãos

2.3.1 Aspectos gerais da cultura do arroz irrigado

2.3.1.1 Ciclo fenológico

Segundo Bergamaschi (2012), a localização no tempo das principais etapas do ciclo de desenvolvimento das espécies vegetais é uma das aplicações agronômicas da fenologia. Dessa forma, é possível confrontar as condições do ambiente a avaliar o desempenho das culturas em diferentes locais e períodos. A fenologia tem papel importante na determinação do rendimento da cultura do arroz (Fukai, 1999). Para a obtenção de altos rendimentos, os estágios fenológicos devem ocorrer quando as condições ambientais são as mais favoráveis possíveis para que a planta possa maximizar a utilização dos recursos do meio (Streck *et al.*, 2006).

O ciclo de crescimento e desenvolvimento do arroz foi descrito detalhadamente por Counce *et al.* (2000) e pode ser dividido, a partir da emergência das plantas, em duas fases distintas: vegetativa e reprodutiva (Figura 6). A fase vegetativa compreende o período entre a emergência até o momento que a panícula começa a se diferenciar, que compreende o estádio

R0. A fase reprodutiva inicia com o estágio R0 e termina com a maturação completa dos grãos (R9) (Counce *et al.*, 2000). Esta é a fase mais importante para a definição do rendimento de grãos, pois é no período entre o estágio R0 e a floração, que fica determinado o número potencial de grãos por panícula, sendo esse componente determinante da produção final. É também nesse período que ocorre a microsporogênese e a floração, em que temperaturas baixas podem causar esterilidade nas flores, reduzindo a proporção de espiguetas cheias (Pinheiro, 2006).

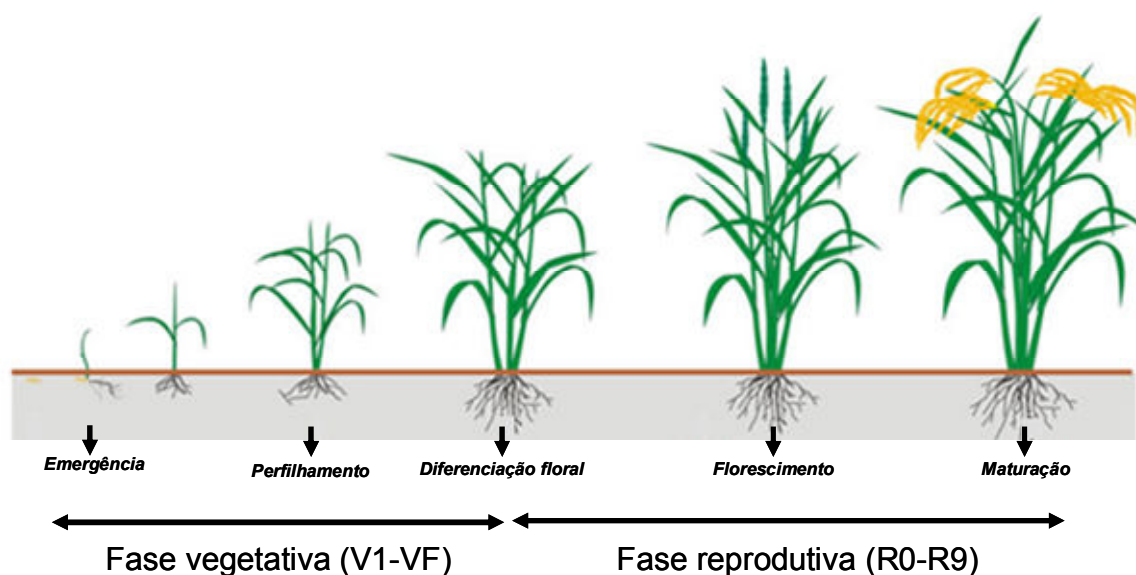


FIGURA 6. Ciclo fenológico da cultura do arroz com a fase vegetativa que corresponde ao período do aparecimento da primeira folha (V1) até a última folha (VF) e a fase reprodutiva a partir do início do desenvolvimento da panícula (R0) até a maturação das panículas (R9). Figura adaptada de EMBRAPA (2011).

2.3.1.2 Exigências bioclimáticas

O arroz é uma espécie anual da família das poáceas, gênero *Oryza*, composto por 22 espécies (Vaughan *et al.*, 2003). Dentre tais espécies, destaca-se a *Oryza sativa* L., por ser a mais cultivada, tendo duas subespécies

indica e *japônica*. Embora seja uma planta de dias curtos, o arroz adapta-se a diversas condições climáticas, por ser cultivado há diversos séculos (Heinemann *et al.*, 2009). Quanto ao aparato fotossintético o arroz é classificado no grupo de plantas C₃, adaptado ao ambiente aquático devido à presença de aerênquima no colmo e nas raízes, o que possibilita a passagem de oxigênio do ar para a camada da rizosfera (SOSBAI, 2010).

De maneira geral, a cultura do arroz desenvolve-se de forma satisfatória em climas quentes e úmidos, sendo melhor adaptado a regiões com alta umidade relativa, grande disponibilidade de radiação solar e com garantia de suprimento de água. Assim, os fatores climáticos preponderantes para o desenvolvimento da planta de arroz são a temperatura, a radiação e a água (umidade do ar e do solo) (Cruz, 2010).

O rendimento de grãos de arroz irrigado está associado à quantidade de matéria seca produzida. Segundo Duy *et al.*, (2004), o número e o tamanho das espiguetas são determinados pela matéria seca acumulada antes do florescimento, enquanto o peso do grão é função da translocação de fotoassimilados e da taxa de duração da fotossíntese após o florescimento. Por sua vez, a produção de matéria seca é definida pelas condições do ambiente, pelas características genéticas da cultivar, e pelas práticas de manejo adotadas na lavoura (Freitas, 2007).

Embora o Estado do Rio Grande do Sul apresente altos níveis médios de rendimento de grãos de arroz irrigado, existe certa variabilidade interanual associada, principalmente, às variações nas condições meteorológicas. A ocorrência de baixas temperaturas e a disponibilidade de radiação solar durante as fases críticas da planta são dois elementos meteorológicos que

estão fortemente relacionados com a variabilidade dos rendimentos do arroz irrigado no Estado (Steinmetz *et al.*, 2005).

Oldeman *et al.* (1986) demonstram que o arroz cultivado em áreas inundadas, onde a disponibilidade de água não restringe o crescimento e o desenvolvimento da cultura, e onde os estresses biológicos e as condições adversas do solo são mínimos, o rendimento potencial está relacionado, principalmente à temperatura do ar e à radiação solar global. Para expressão de seu potencial produtivo, a cultura requer temperatura ao redor de 24 a 30°C e radiação solar elevada (SOSBAI, 2010).

Apesar de não poder ser considerada isoladamente, a temperatura do ar é um dos elementos meteorológicos que exerce maior influência sobre o crescimento, desenvolvimento e rendimento de grãos do arroz. Em geral, a cultura exige temperaturas relativamente elevadas da germinação à maturação, uniformemente crescentes até a floração, e decrescentes, porém sem diminuições bruscas após a floração (Yoshida, 1981).

As plantas de arroz são mais sensíveis aos efeitos das baixas temperaturas nas fases de pré-floração e floração, em que a esterilidade das espiguetas pode causar decréscimos acentuados de rendimento (Mota, 1994). Nestas fases, as temperaturas crítica, variam de acordo com as características das pesquisas realizadas, podendo ser de 13°C, variar entre 15°C e 17°C, para os genótipos tolerantes (Terres & Galli, 1985); e, entre 17°C e 19°C, para os suscetíveis (Satake, 1976) ou 15°C (Board *et al.*, 1980). Durante a fecundação das flores de arroz a temperatura crítica oscila na faixa entre 15°C e 17°C. Plantas que estão com o primórdio floral em iniciação, submetidas a 17°C durante cinco dias resultam completamente estéreis, enquanto que a 15°C

durante apenas uma hora cessa a formação de pólen. Para alguns genótipos, temperaturas inferiores a 19°C já induzem a esterilidade (Terres & Galli, 1985).

Entre as diferentes regiões produtoras de arroz irrigado, no Brasil, o Estado do Rio Grande do Sul é onde a ocorrência de baixas temperaturas exerce maior influência no rendimento de grãos da cultura (Heinemann *et al.*, 2009). As fases da cultura mais afetadas pelas baixas temperaturas, no Estado, são germinação, emergência e reprodutiva, sendo que podem causar decréscimos no rendimento de grãos superiores a 25% e, em algumas situações, até 50% (Steinmetz *et al.*, 2006).

Estudos de probabilidade de ocorrência de temperaturas prejudiciais na fase reprodutiva do arroz irrigado no Rio Grande do Sul mostram que os períodos de menor risco ocorrem durante os meses de janeiro e fevereiro e no primeiro decêndio de março, mas que há diferenças acentuadas entre as regiões produtoras. Por outro lado, os riscos são mais elevados durante o mês de dezembro e no segundo e terceiro decêndios de março (Steinmetz *et al.*, 2003). Para a fase reprodutiva, a temperatura crítica de 15°C tem sido usada como referência em estudos climatológicos que envolvem arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Steinmetz *et al.*, 2001).

Em regiões onde a temperatura do ar não é um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento do arroz irrigado, a radiação solar é um dos principais fatores que influenciam a produção do grão. A exigência de radiação solar pela cultura do arroz varia de uma fase fenológica para a outra. Durante a fase vegetativa, ela tem relativamente pouca influência sobre o rendimento e os seus componentes. Entretanto, os índices de radiação solar durante as fases reprodutiva e de maturação influenciam fortemente os rendimentos de arroz

irrigado, pois o sombreamento durante estes estádios reduzem o número de espiguetas e a percentagem de grãos obtida (Yoshida & Parao, 1976). Vários estudos mostram que, nessas fases, há uma relação linear positiva entre essa variável e a produção de grãos (Steinmetz, 2004).

O decréscimo no rendimento de grãos de arroz pode atingir 70%, no caso das plantas serem submetidas a baixos níveis de radiação solar, principalmente se esta redução ocorrer nas fases reprodutiva e de enchimento de grãos (Yoshida & Parao, 1976). Yoshida (1981) também verificou que a radiação solar durante o período reprodutivo tem um efeito marcante no rendimento de grãos do arroz, e que no período vegetativo é menor.

Os elementos meteorológicos radiação solar global e a temperatura mínima do ar podem ser considerados como indicadores agrometeorológicos do rendimento de grãos de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul por responderem por parte da variabilidade dos rendimentos desta cultura (Klering *et al.*, 2008).

Embora os elementos meteorológicos previamente citados sejam os que mais afetam o rendimento de grão de arroz irrigado no Estado, existem outros que também podem causar danos consideráveis, dependendo da sua intensidade, da época de ocorrência e área de abrangência. Entre estes, destacam-se o granizo, os vendavais, as chuvas intensas ou excessivas e as estiagens prolongadas (EMBRAPA, 2005).

2.3.1.3 Efeitos associados ao fenômeno El Niño Oscilação Sul na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) é fenômeno de acoplamento oceano-atmosfera, cuja origem localiza-se no Oceano Pacífico Tropical, caracterizado pela ocorrência de anomalias no padrão de temperatura da superfície do mar (TSM) e no padrão de diferença de pressão atmosférica, medidas nas localidades do Taiti, na Polinésia Francesa, e de Darwin, no norte da Austrália (Ropelewsky & Halpert, 1987; Oliveira, 2001).

O fenômeno ENOS é considerado de grande escala e apresenta duas fases opostas: uma quente, denominada El Niño e outra fria, denominada La Niña. Em linhas gerais, o El Niño corresponde ao aquecimento anômalo das águas superficiais no centro-leste do Oceano Pacífico equatorial aliado à diminuição das pressões atmosféricas. Ao contrário, o La Niña corresponde ao resfriamento anômalo das águas superficiais no Oceano Pacífico equatorial central leste, aliado ao aumento das pressões atmosféricas.

As fases quente e fria do ENOS interferem na circulação atmosférica regional e global, causando impactos no clima de diversas regiões do Planeta. No Estado do Rio Grande do Sul os principais efeitos associados ao ENOS estão relacionados com a precipitação pluvial e a temperatura do ar (Grimm *et al.*, 1998; Montecinos *et al.*, 2000; Fontana & Berlato, 1997; Berlato & Fontana, 2003).

No que se refere à precipitação pluvial, Puchalski (2000) mostrou que a região noroeste do Estado é a mais influenciada pelo fenômeno, produzindo anomalias positivas (El Niño) e anomalias negativas (La Niña) na precipitação. Neste trabalho foi demonstrado também que os impactos do ENOS são

maiores na primavera e início do verão do ano de início do fenômeno, meses em que um adequado suprimento hídrico é muito importante para o estabelecimento das culturas de primavera-verão. De acordo com Fontana & Almeida (2002), é na região nordeste do Estado que se verificam os maiores efeitos associados ao fenômeno ENOS no número de dias com precipitação pluvial, sendo maior durante os eventos El Niño e menor durante os eventos La Niña.

Quanto à influência do ENOS na temperatura do ar no Rio Grande do Sul, Lopes & Berlato (2000) demonstraram que a influência de La Niña é maior do que a de El Niño nas temperaturas médias mínimas e médias máximas. Segundo Puchalski (2000), a temperatura média do ar em anos de La Niña é inferior à temperatura normal, em praticamente todos os meses do ano. Lopes & Berlato (2003), também, constataram a ocorrência redução da temperatura mínima do ar em todos os meses do ano, porém com maior intensidade na primavera e início do verão, do primeiro ano de ocorrência do fenômeno. Em anos de El Niño, os mesmos autores observaram que, a temperatura média mínima do outono-início de inverno é superior à média climatológica.

Diversos estudos vêm mostrando os efeitos associados ao El Niño e La Niña sobre o rendimento de grãos de arroz irrigado e sobre os elementos meteorológicos mais importantes para a definição deste.

Os primeiros estudos, para o Rio Grande do Sul, elaborados por Mota & Silva (1993), indicaram que a influência do fenômeno ENOS na variabilidade dos rendimentos de grãos de arroz irrigado não é tão evidente quanto ao observado em outras culturas de primavera-verão cultivadas no Estado, devido ao fato de que o arroz é cultivado, no Estado, sob o sistema de inundação.

Mota (2000a), estudando a influência dos eventos de El Niño e La Niña no rendimento de grãos de arroz irrigado na região de Pelotas (Zona Sul do Rio Grande do Sul), concluiu que estes eventos afetam o rendimento de grãos na região por modificarem a disponibilidade de radiação solar diária. Em anos de El Niño o rendimento de grãos diminuiu 6,5% com relação à média, já em anos de La Niña o rendimento de grãos aumentou 9,5%.

Também Mota (2000b), avaliando a influência quantitativa dos fenômenos El Niño e La Niña na necessidade de irrigação da cultura do arroz irrigado em Pelotas, concluiu que a ocorrência dos eventos modifica a necessidade de irrigação do arroz, aumentando em média em 43,8% nos anos de eventos fortes de La Niña e diminuindo em 36,5% nos anos de eventos El Niño fortes.

Segundo Carmona & Berlato (2002), os eventos El Niño são desfavoráveis para a cultura do arroz irrigado em 53% dos casos e os eventos La Niña são favoráveis à cultura do arroz em 60% dos casos. A menor disponibilidade de insolação, associada ao aumento de precipitação pluvial, que ocorre no período outubro a fevereiro é uma das causas do evento El Niño ser desfavorável à cultura do arroz irrigado. Já para a La Niña, a maior frequência de eventos favoráveis, pode ser creditada, em parte, aos altos índices de insolação relativa verificados principalmente nos meses de outubro, novembro e dezembro. Resultados semelhantes foram encontrados por Mota (1999) para a região de Pelotas.

2.3.1.4 Zoneamento agrícola

O Zoneamento Agrícola é um instrumento de política agrícola e gestão de riscos na agricultura. O estudo é elaborado com o objetivo de minimizar os riscos relacionados aos fenômenos climáticos e permite a cada município identificar a melhor época de plantio das culturas, nos diferentes tipos de solo e ciclos de cultivares (MAPA, 2012). Segundo Pereira *et al.* (2002), o zoneamento agrícola compreende o zoneamento agroecológico e o levantamento das condições socioeconômicas das regiões.

O zoneamento agrícola para a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul, elaborado por Steinmetz *et al.* (2007), definiu as épocas de semeadura favoráveis nas distintas regiões agroecológicas do Estado (Figura 7). Os critérios utilizados, baseados nas exigências bioclimáticas da cultura, foram: temperatura do solo desnudo, a 5 cm de profundidade, maior ou igual a 20°C, como indicador do início da semeadura; probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas do ar menores ou iguais a 15°C, durante os períodos de pré-floração e floração, e disponibilidade de radiação solar nas fases reprodutiva e de maturação.

Foram estabelecidos dezesseis grandes grupos de períodos de semeadura, sendo quatro para cultivares de ciclo tardio, quatro para cultivares de ciclo médio, quatro para cultivares de ciclo precoce e quatro para cultivares de ciclo muito precoce.

De maneira geral, observa-se que nas regiões mais quentes a semeadura deve ter início no dia 21 de setembro e ser finalizada em 10 de dezembro. Nas regiões mais frias a data final de semeadura também é 10 de

dezembro, no entanto, em função da temperatura do solo, a sementeira é iniciada mais tarde, ou seja, 21 de outubro.

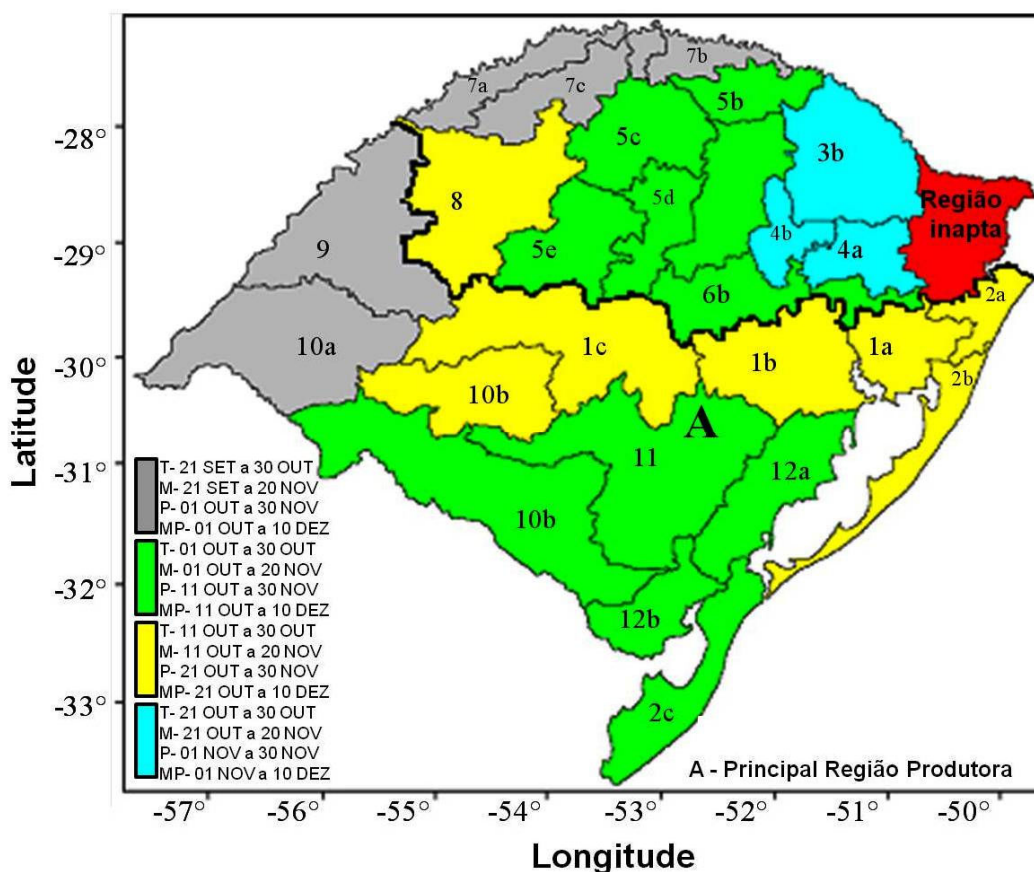


FIGURA 7. Zoneamento Agroclimático por época de sementeira para o arroz irrigado, cultivares de ciclos tardios (T), médios (M), precoces (P) e muito precoces (MP) no Estado do Rio Grande do Sul. Os números e as letras indicam as regiões e sub-regiões agroecológicas. Fonte: Adaptado de Steinmetz *et al.*, (2007).

2.3.1.5 Regiões de cultivo no Rio Grande do Sul

Embora o zoneamento agrícola do arroz irrigado no Rio Grande do Sul considere apenas uma pequena região inapta para o cultivo do grão, devido à alta probabilidade de ocorrência de baixas temperaturas durante o período crítico, a principal região produtora localiza-se na metade sul Estado.

Segundo a classificação utilizada pelo Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), o arroz irrigado é cultivado nas seguintes regiões: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos, Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos e Zona Sul. Essas regiões apresentam diferenças quanto à topografia, clima, solos, disponibilidade de água para irrigação, tamanho de lavoura, etc, determinando variações em termos de produção e rendimento de grãos médio (Azambuja *et al.*, 2004).

Segundo dados obtidos a partir do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), entre as safras agrícolas de 1990/91 até 2009/10, a maior parte do arroz irrigado no Rio Grande do Sul é produzida na região da Fronteira Oeste (30%), onde também se verifica os maiores níveis de rendimento de grãos (próximos a 6 t ha⁻¹).

2.3.1.6 Dados oficiais de rendimento de grãos

O crescimento acelerado da população está aumentando a demanda por arroz em proporções não compatíveis com o crescimento da produção, ou seja, a produção mundial do grão não vem acompanhando o crescimento do consumo (EMBRAPA, 2005). Entre os anos de 1975 e 2005, o Brasil reduziu a área plantada em torno de 26% e, mesmo assim, aumentou sua produção de arroz em 69%, graças ao aumento de 128% no rendimento médio de grãos proporcionado pelo melhoramento genético das cultivares utilizadas. O crescimento da produção permitiu ao País tornar-se autossuficiente em arroz a partir da safra 2003/04. No ano de 2008, o Brasil chegou a exportar 400 mil

toneladas. Atualmente apenas 5% da produção nacional é destinada à exportação (MAPA, 2012).

Em termos de rendimento no Brasil a média é de $3,7 \text{ t ha}^{-1}$, bastante inferior aos Estados Unidos e China, mas semelhante a países com tradição secular de cultivo tais como Índia e Filipinas (Figura 8).

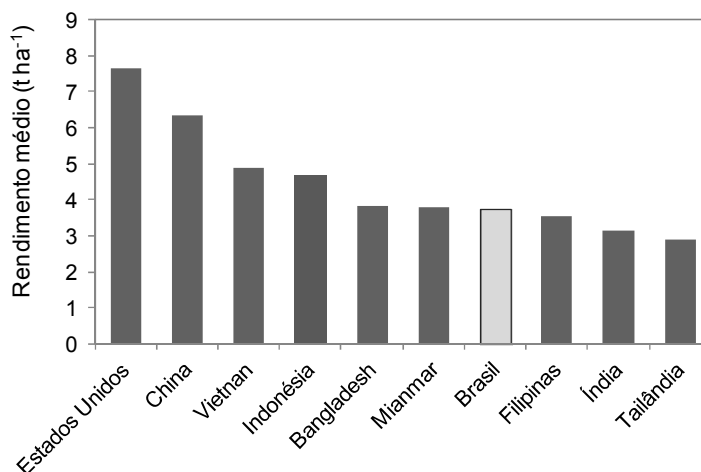


FIGURA 8. Rendimento médio de grãos de arroz nos principais países produtores. Período: 2000 a 2010. Fonte dos dados: FAOSTAT, (2012).

Os rendimentos de grãos de arroz irrigado obtidos no Rio Grande do Sul são superiores aos observados em nível nacional (Figura 9), atingindo níveis similares aos obtidos nos países que registram os maiores rendimentos de grãos mundiais (Estados Unidos e China - Figura 3), nas safras agrícolas de 2010/11 e 2011/12.

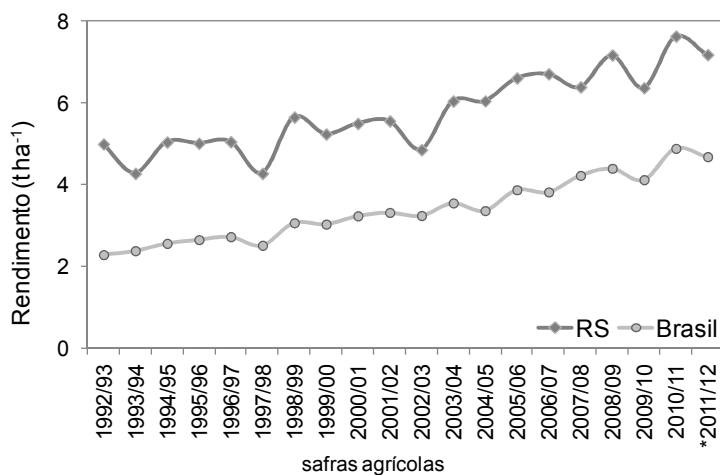


FIGURA 9. Rendimento de grãos de arroz irrigado ($t\ ha^{-1}$) no Brasil e no Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas 1989/90 até 2011/12. Fonte dos dados: IBGE/LSPA, (2012); CONAB, (2012b). * Estimativa de produção divulgada pela CONAB, (2012).

2.3.2 Modelagem de rendimento de grãos de arroz irrigado

2.3.2.1 Aspectos gerais relacionados à modelagem

Modelos de simulação de culturas podem ser entendidos como equações matemáticas, empíricas ou mecanísticas, que visam simplificar a realidade e representar o acúmulo de biomassa e o desenvolvimento das plantas, para prever seu rendimento em função dos fatores influentes (Monteith, 1996, Passioura, 1996).

Os modelos empíricos, também denominados modelos de correlação ou estatísticos, são essencialmente práticos e se baseiam em análises de regressões para prever o desenvolvimento da cultura (Passioura, 1973; Dourado-Neto *et al.*, 1998). Os modelos mecanísticos, também chamados de modelos exploratórios, descrevem através de equações matemáticas os processos físicos e biológicos de crescimento e desenvolvimento de uma cultura agrícola (Thornley, 1976).

A maioria dos modelos de simulação de culturas é uma mistura de empirismo e mecanicidade. Até mesmo o mais mecanístico dos modelos utiliza o empirismo em algum nível hierárquico de sua estrutura (Whisler *et al.*, 1986; Boote *et al.*, 1996). Modelos simples podem ser utilizados desde que se baseiem em princípios físicos sólidos e robustos, no entanto muitas vezes modelos empíricos só podem ser utilizados para o conjunto de dados com o qual foram calibrados. O desenvolvimento destes modelos podem fornecer meios para a interpretação e análise do conjunto de dados utilizado para a calibração dos mesmos (Monteith, 1996).

Segundo Dourado-Neto *et al.* (1998), o objetivo da modelagem é produzir uma ferramenta que poderá ser usada para gerar, testar ou refutar hipóteses, para sugerir experimentos, e, além disso, para prever o comportamento do sistema em situações desconhecidas.

As etapas de elaboração ou adaptação de um modelo para determinadas condições ambientais são: desenvolvimento do modelo, verificação da lógica envolvida, calibração ou ajuste dos parâmetros e, por fim, validação (Jones *et al.*, 1987).

Segundo Monteith (1981), em geral não há melhoria na estimativa de rendimentos agrícolas com o aumento da complexidade dos modelos utilizados, independentemente de seu tipo. Assim, os pesquisadores vêm fazendo esforços para condensar os modelos, removendo os componentes que não trazem melhorias significativas nas estimativas numéricas dos resultados finais.

2.3.2.2 Modelos agrometeorológicos-espectrais para estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado

Os modelos de análise da cultura e seu meio, ou modelos agrometeorológicos, visam representar, de forma simplificada, as relações existentes entre a resposta da planta e as variáveis ambientais durante todo o ciclo da cultura. Esse tipo de modelo requer um conhecimento detalhado sobre as interações entre a planta, o solo e o meio atmosférico, tais como: fluxo de água no solo e na planta, evapotranspiração, radiação solar, etc. Essas interações são transferidas para sistemas de equações que permitem analisar as contribuições das variáveis meteorológicas na definição do rendimento de grãos final da cultura (Berlato, 1987).

Um dos primeiros modelos para estimar o rendimento de arroz através de variáveis meteorológicas foi proposto por Murata (1966). Foram utilizados valores médios de temperatura do ar e radiação solar do período de formação da produção, que compreende os dez dias anteriores e trinta posteriores a floração, e a produtividade relativa de arroz irrigado (porcentagem em relação à produtividade máxima de cada cultivar no ano) de uma região do Japão. Os dados foram ajustados através de regressão quadrática para determinação dos níveis ótimos de rendimento.

Seshu & Candy (1984) propuseram modelos agrometeorológicos de estimativa de rendimento de arroz irrigado baseados em regressões lineares múltiplas. Foram utilizados os elementos climáticos radiação solar global e temperatura do ar. Para tanto foram realizados experimentos em quarenta ambientes diferentes (oito locais no continente asiático, dois locais na América do Sul, um na África e um na Oceania). Entre os modelos gerados, a equação

preditiva baseada na radiação solar e na temperatura mínima, ocorridas durante o estágio de maturação (trinta dias após o florescimento), foi a que apresentou a melhor capacidade preditiva. As condições ambientais apresentaram variações de temperatura mínima entre 17,4 e 29,2°C e de radiação solar entre 315 to 637 m Wh cm⁻². O rendimento estimado apresentou incremento de 0,41 t ha⁻¹ para cada 100 m Wh cm⁻² adicionais de radiação solar e um decréscimo de 0,0068 t ha⁻¹ para cada grau de incremento a temperatura mínima.

Modelos agrometeorológicos de estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado para o Estado do Rio Grande do Sul foram propostos por Carmona (2001) e Klering *et al.*, (2008).

O modelo proposto por Carmona (2001) foi baseado na regressão linear múltipla entre o rendimento de grãos, a insolação relativa e o número de dias com temperatura mínima igual ou inferior a 15°C. Os resultados mostraram que a insolação relativa é importante durante todo o período de desenvolvimento da cultura, enquanto que a ocorrência de temperaturas iguais ou inferiores a 15°C nos meses de janeiro, fevereiro e março penaliza os rendimentos do grão.

Klering *et al.* (2008) utilizaram dados de radiação solar global e temperatura mínima do ar menor ou igual a 15°C, do período de 1982 a 2006, para elaborar um modelo de estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado. O modelo foi ajustado através de regressão linear múltipla pelo método *Stepwise* (Equação 3).

$$\hat{Y} = 0,066i + [2,996 + 0,079(\text{radfev}) - 0,038(\text{dimar})] \quad (3)$$

Na qual: \hat{Y} é o rendimento de arroz irrigado ($t\ ha^{-1}$); i é o ano; $radfev$ é a radiação solar global acumulado no mês de fevereiro e $dimar$ é o número de dias com temperatura do ar igual ou menor que $15^{\circ}C$. Os resultados mostraram que os elementos meteorológicos utilizados foram adequados para estimar o rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, sendo que o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os dados estimados e os observados foi de 0,86.

Alguns autores têm proposto a utilização de uma variável espectral para estimar o rendimento. Neste caso, os modelos denominados espectrais, relacionam os IVs ao rendimento das culturas através de equações. Esses modelos também podem ser associados a modelos agrometeorológicos, sendo então denominados modelos agrometeorológicos-espectrais.

No modelo agrometeorológico-espectral a hipótese é de que a componente agrometeorológica representa as condições de radiação solar incidente, temperatura e umidade do ar e disponibilidade hídrica, enquanto que a componente espectral expressa, além das condições ambientais, as diferenças de prática de manejo, cultivares e estresses não incluídos nos modelos agrometeorológicos (Rudorff & Batista, 1990).

Chang *et al.* (2005) propuseram modelos espectrais para estimar o rendimento de arroz para Taiwan, utilizando dados obtidos a partir de medidas realizadas com espectroradiômetros. O objetivo dos autores foi identificar as principais características espectrais associadas à produção e estabelecer relações quantitativas. As análises mostraram que as alterações espectrais na reflectância foram mais significativas durante o estágio fenológico do emorrachamento. Assim, os valores de reflectância do dossel da cultura

durante este período foram selecionados para o desenvolvimento dos modelos. Por fim, foram ajustados dois modelos baseados em regressão linear múltipla. O primeiro utilizou a razão entre as reflectâncias das bandas do infravermelho próximo (0,61 μm) e do vermelho (0,59 μm) e o segundo a razão entre as bandas do infravermelho próximo e do verde (0,50 μm). Os resultados da validação dos modelos mostraram que estes foram eficientes para estimar o rendimento de arroz irrigado na região de estudo.

Prasad *et al.* (2007) estimaram o rendimento de arroz irrigado na Índia através de um modelo agrometeorológico-espectral. Foram utilizados dados de temperatura e umidade do solo, precipitação e NDVI. Os dados espectrais utilizados para construção do NDVI foram obtidos do sensor *AVHRR/NOAA*. O modelo empírico foi ajustado através de regressão pelo Método de Quase-Newton (Setiono *et al.*, 2002) e explicou 90% dos rendimentos durante o período de ajuste. O modelo foi validado, a partir de dados independentes, sendo que as diferenças entre os rendimentos preditos e os observados variaram, em média, 15%.

Wang *et al* (2010) propuseram um modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de arroz para cada uma das duas estações de produção em Taiwan. Neste estudo, foram realizadas medidas pontuais de reflectância do dossel através de espectralradiômetros nos comprimentos de onda infravermelho, vermelho e verde. A razão entre as bandas infravermelho/vermelho e infravermelho/verde foram utilizadas para gerar modelos de estimativa de rendimento do arroz através de regressão linear múltipla. Para a validação dos modelos foram utilizadas as mesmas razões entre bandas, com as reflectâncias obtidas através de dados provenientes do

sensor *SPOT VEGETATION*, de anos diferentes. Os testes de validação mostraram que o erro médio da produção predita por unidade de área, proposta pelos modelos foram menores que $0,7 \text{ t ha}^{-1}$. Os resultados indicaram que essa metodologia pode ser utilizada para outras localizações geográficas e que podem ser utilizados dados provenientes de outros sensores, com bandas espectrais semelhantes, desde que sejam previamente estabelecidas as relações entre o rendimento de grãos arroz e as razões entre as bandas espectrais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo compreendeu a região produtora de arroz irrigado do Estado do Rio Grande do Sul, que se localiza entre as latitudes de 28°00' e 33°45' Sul e longitudes de 49°43' e 57°39' Oeste, tendo uma área total de, aproximadamente, 165.408km². A região é dividida, segundo as regiões político-administrativas do Instituto Rio Grandense do Arroz Irrigado (IRGA), da seguinte forma: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos, Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos e Zona Sul (Figura 10). Essas regiões apresentam diferenças, principalmente, quanto à topografia, clima, solos, disponibilidade de água para irrigação, tamanho de lavoura, etc, determinando variações em termos de área cultivada, produção e rendimento médio. Neste trabalho, para fins de simplificação, as regiões orizícolas Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos e Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos passarão a ser abreviadas para Planície Interna e Planície Externa, respectivamente.

O clima da região orizícola do Estado do Rio Grande do Sul é classificado, segundo Köppen (1948), como zona climática fundamental temperada (C), tipo fundamental úmido (f) e variedade específica subtropical

(Cfa) com precipitação pluvial bem distribuída ao longo do ano e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C.

A média anual de precipitação pluvial da região de estudo é de 1.562 mm, com pequena variação entre os meses do ano. A insolação anual é em média de 2.217 horas, variando entre os meses de 129 (junho) até 244 horas (dezembro). A temperatura mínima média anual é de 14,5°C oscilando entre 9,2 (julho) e 19,4 °C (janeiro). Durante a safra do arroz (de setembro a abril) o total de precipitação pluvial é, em média, de 1.070 mm. A insolação média mensal é superior a 170 horas e a temperatura mínima mensal oscila entre 11,4 e 19,4 °C. Esses valores foram calculados a partir das normais climatológicas de 1980-2009 disponibilizadas em Cordeiro (2010).

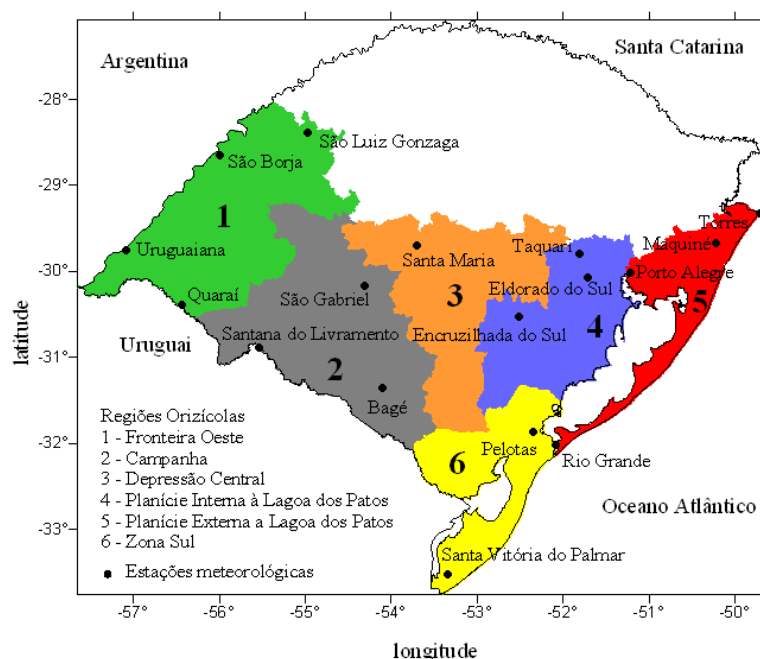


FIGURA 10. Regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul e estações meteorológicas utilizadas. Fonte de dados: IRGA e 8°DISME/INMET.

3.2 Período de estudo

O período de estudo abrangeu 10 safras agrícolas, de 2000/01 até 2009/10, estendendo-se de setembro a abril, compreendendo, assim, o período de desenvolvimento da cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

3.3 Dados

3.3.1 Estatísticas agrícolas

Foram utilizados dados de área cultivada, área colhida e produção de grãos de arroz irrigado da área de estudo. Esses dados foram obtidos a partir do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponibilizados pelo Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Os dados foram obtidos em nível municipal e agrupados de acordo com a região orizícola à qual pertencem.

3.3.2 Rendimento de grãos

O rendimento de grãos de arroz irrigado ($t\ ha^{-1}$), para cada região orizícola, foi calculado dividindo-se a quantidade produzida pela área colhida. Foram construídos gráficos de evolução temporal e calculadas as estatísticas descritivas (média aritmética, desvio-padrão e CV) para cada região.

3.3.3 Dados meteorológicos

Utilizaram-se dados meteorológicos diários e mensais de insolação, radiação solar global e temperatura mínima do ar, de 17 estações meteorológicas (Figura 10), incluídas dentro da região de estudo, pertencentes

ao 8° Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia (8° DISME/INMET) e à Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO) da Secretaria da Agricultura, Pecuária e Agronegócio do Estado do Rio Grande do Sul (Tabela 2).

TABELA 2. Regiões orizícolas, estações meteorológicas, coordenadas geográficas e Instituição.

Região	Localidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Fonte
1	Quaraí	30°23'S	56°26'W	100	FEPAGRO
	São Borja	28°39'S	56°00'W	99	FEPAGRO
	São Luiz Gonzaga	28°23'S	54°58'W	245	8°DISME/INMET
	Uruguaiana	29°45'S	57°05'W	62	8°DISME/INMET
2	Bagé	31°21'S	54°06'W	241	8°DISME/INMET
	Santana do Livramento	30°53'S	55°32'W	234	8°DISME/INMET
	São Gabriel	30°10'S	54°19'W	124	8°DISME/INMET
3	Santa Maria	29°42'S	53°42'W	95	8°DISME/INMET
4	Eldorado do Sul	30°04'S	51°43'W	46	UFRGS
	Encruzilhada do Sul	30°32'S	52°31'W	427	8°DISME/INMET
	Taquari	29°48'S	51°49'W	76	FEPAGRO
5	Maquiné	29°40'S	50°13'W	32	FEPAGRO
	Porto Alegre	30°01'S	51°13'W	46	8°DISME/INMET
	Torres	29°20'S	49°43'W	30	8°DISME/INMET
6	Pelotas	31°52'S	52°21'W	13	8°DISME/INMET
	Rio Grande	32°01'S	52°05'W	2	8°DISME/INMET
	Santa Vitória do Palmar	33°31'S	53°21'W	24	8°DISME/INMET

(1) Fronteira Oeste; (2) Campanha; (3) Depressão Central; (4) Planície Interna; (5) Planície Externa; (6) Zona Sul.

Os dados de insolação foram utilizados para estimar a radiação solar global, em virtude de que as estações meteorológicas do 8° DISME/INMET não possuem séries históricas deste elemento meteorológico. Neste caso, para

estimar a radiação solar global foi utilizada a equação de Ångström (Equação 4).

$$\frac{R_g}{R_a} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

Na qual: R_g é o fluxo de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_a é a radiação solar incidente numa superfície horizontal paralela à superfície do solo no topo da atmosfera ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); n é o número de horas de sol ocorrido; N o número de horas de sol astronomicamente possível de ocorrer; β_0 e β_1 são os coeficientes empíricos, obtidos por análise de regressão para determinada localidade ou região.

Os coeficientes β_0 e β_1 utilizados na equação foram os definidos por Fontana & Oliveira (1996), conforme a Tabela 3.

TABELA 3. Coeficientes da equação de Ångstrom (β_0 e β_1), utilizados para as estações meteorológicas em estudo. Fonte: Fontana & Oliveira, (1996).

Localidade (Região)	Set		Out		Nov		Dez		Jan		Fev		Mar		Abr	
	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1
(1) São Luiz Gonzaga	0,23	0,41	0,23	0,47	0,24	0,40	0,31	0,34	0,34	0,30	0,23	0,38	0,27	0,36	0,26	0,32
(1) Uruguaiana	0,23	0,41	0,23	0,47	0,24	0,40	0,31	0,34	0,34	0,30	0,23	0,38	0,27	0,36	0,26	0,32
(2) Bagé	0,23	0,41	0,23	0,47	0,24	0,40	0,31	0,34	0,34	0,30	0,23	0,38	0,27	0,36	0,26	0,32
(2) Santana do Livramento	0,23	0,41	0,23	0,47	0,24	0,40	0,31	0,34	0,34	0,30	0,23	0,38	0,27	0,36	0,26	0,32
(3) Santa Maria	0,20	0,40	0,22	0,50	0,24	0,45	0,28	0,42	0,28	0,42	0,23	0,42	0,31	0,34	0,24	0,40
(4) Encruzilhada do Sul	0,14	0,49	0,16	0,48	0,23	0,34	0,28	0,29	0,36	0,17	0,17	0,41	0,17	0,47	0,13	0,46
(5) Porto Alegre	0,20	0,40	0,22	0,50	0,24	0,45	0,28	0,42	0,28	0,42	0,23	0,42	0,31	0,34	0,24	0,40
(5) Torres	0,19	0,47	0,24	0,40	0,20	0,45	0,29	0,31	0,22	0,45	0,21	0,39	0,25	0,39	0,25	0,35
(6) Pelotas	0,19	0,47	0,24	0,40	0,20	0,45	0,29	0,31	0,22	0,45	0,21	0,39	0,25	0,39	0,25	0,35
(6) Rio Grande	0,19	0,47	0,24	0,40	0,20	0,45	0,29	0,31	0,22	0,45	0,21	0,39	0,25	0,39	0,25	0,35
(6) Santa Vitória do Palmar	0,19	0,47	0,24	0,40	0,20	0,45	0,29	0,31	0,22	0,45	0,21	0,39	0,25	0,39	0,25	0,35

(1) Fronteira Oeste; (2) Campanha; (3) Depressão Central; (4) Planície Interna; (5) Planície Externa; (6) Zona Sul.

3.3.4 Imagens de satélite

Foram utilizadas 160 imagens de satélite provenientes do sensor MODIS, produto MOD13Q1, coleção 5, que contém composições de imagens de 16 dias sob a forma dos índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), além da reflectância de superfície correspondente às bandas do azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio, em uma resolução espacial de 250m. Este produto foi obtido de forma gratuita, mediante cadastro antecipado, através do site do Sistema de Observação da Terra (EOS) da NASA (<https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>) para o período de setembro de 2000 até abril de 2010. Utilizaram-se neste trabalho, apenas as imagens referentes ao NDVI.

A partir de 2012 as imagens MODIS estão disponibilizadas no *site* Reverb, do Sistema de Informações e Dados, também do EOS/NASA (http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle).

3.4 Análises

3.4.1 Estatísticas agrícolas

Para a caracterização da produção de arroz irrigado, nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, foram calculadas algumas estatísticas descritivas da base de dados oficiais do IBGE nas safras estudadas. Para os dados de área cultivada (ha), área colhida (ha) e produção (t) foram calculadas a média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação (CV). Também foram elaborados gráficos da evolução temporal dessas variáveis para as diferentes regiões orizícolas e para o Estado como um todo (integração das regiões orizícolas). A partir da integração dos dados destas regiões estabeleceram-se os totais de área semeada, área colhida e produção para todo o Estado. Posteriormente, testou-se a existência de tendência temporal destas variáveis através do teste *t-Student*, a 5% de probabilidade, para os coeficientes de inclinação das retas das regressões lineares ajustadas.

A partir do conjunto de dados de rendimento, verificou-se a existência de tendência temporal, ou seja, existência ou não de tendência de aumento dos rendimentos da cultura do arroz, em razão da incorporação de novas tecnologias (cultivares, práticas de manejo etc.) ao longo do período de estudo. A equação ajustada foi uma regressão linear simples, dada por:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (5)$$

Na qual: Y_i é o rendimento de grãos de arroz irrigado ($t \text{ ha}^{-1}$); β_0 é o coeficiente linear ($t \text{ ha}^{-1}$); β_1 é o coeficiente de regressão da variável independente ($t \text{ ha}^{-1}$); x_i é o ano i (o ano 1 corresponde ao rendimento de grãos da safra 2000/01).

Para se constatar a existência de tendência temporal, foi feito o teste *t-Student*, a 10% de probabilidade, para o coeficiente de regressão β_1 , para testar as hipóteses: $\beta_1 = 0$, não existe tendência; e $\beta_1 > 0$, existe tendência de crescimento.

As séries históricas de rendimento das seis regiões orizícolas e também a série referente ao Estado como um todo foram corrigidas por meio da retirada da tendência tecnológica, inversão da Equação 5 e aplicação dos parâmetros gerados no ajuste da equação, para cada região orizícola:

$$Y_{ci} = Y_i - \beta_1 x_i \quad (6)$$

Na qual: Y_{ci} é o rendimento corrigido do ano i ; Y_i é o rendimento original do ano i ; β_1 é o coeficiente de regressão linear; x_i é o ano i .

3.4.2 Estimativa de área cultivada com arroz irrigado a partir de imagens MODIS

3.4.2.1 Determinação das máscaras de cultivo

Para a construção das máscaras de cultivo de arroz irrigado utilizou-se uma metodologia baseada no mapeamento de culturas de verão proposto por

Araújo (2010). Neste método, as máscaras de cultura são construídas através da classificação digital supervisionada. As amostras para treinamento do classificador são coletadas em uma imagem de composição colorida, frequentemente denominada composição RGB (R=vermelho, G=verde, B=azul), elaborada a partir de imagens multitemporais NDVI/MODIS, de determinados períodos do ciclo da cultura. Estas composições tiveram como objetivo destacar apenas as áreas cultivadas com arroz irrigado (Figura 11).

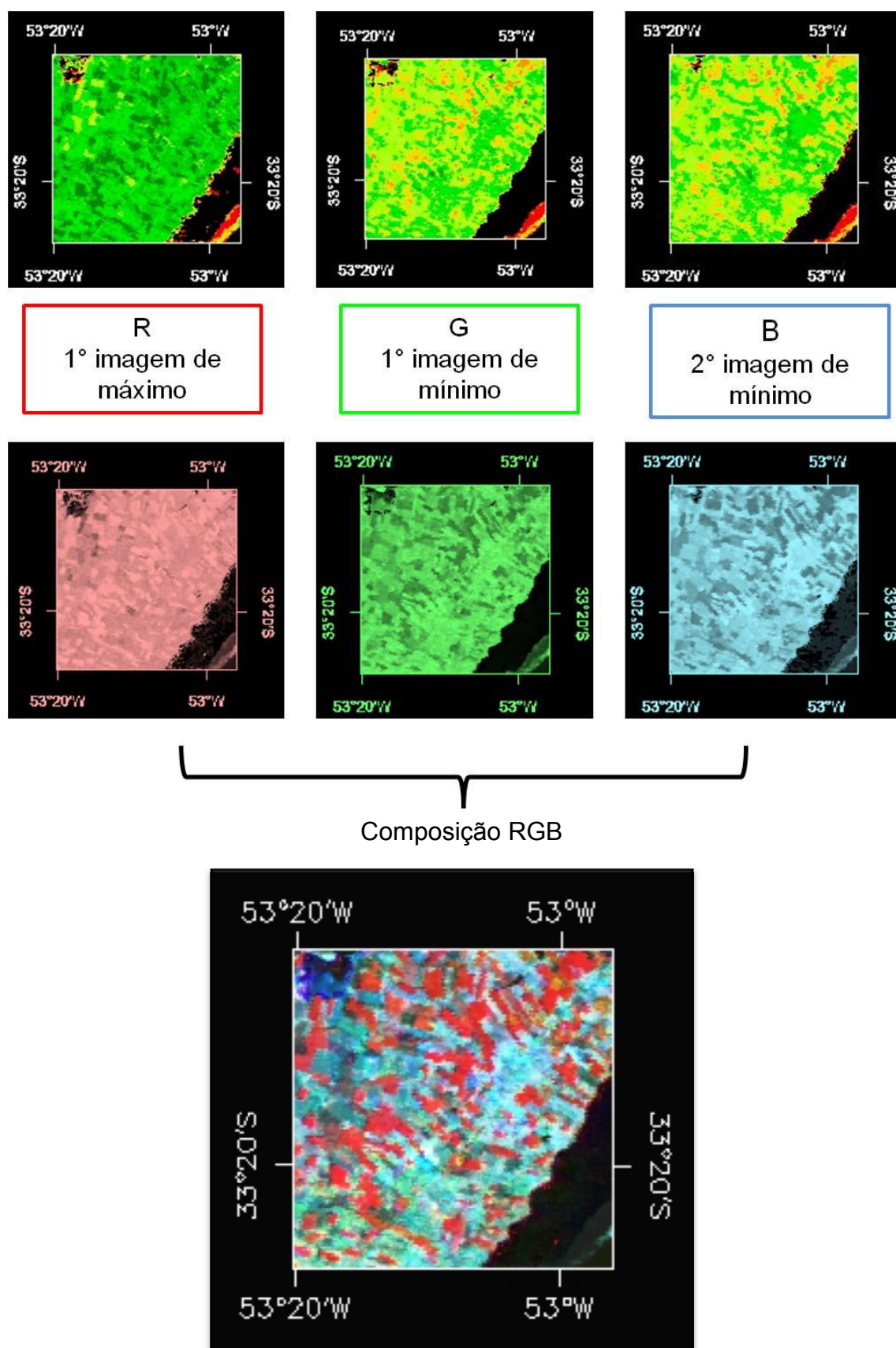


FIGURA 11. Esquema de obtenção da imagem composição colorida (RGB) utilizando o atributo multitemporal das imagens MODIS.

Segundo o calendário agrícola médio do arroz irrigado no Rio Grande do Sul a cultura é implantada na primeira quinzena de outubro, tem a lâmina d'água aplicada na segunda quinzena de novembro e atinge o máximo crescimento vegetativo entre a segunda quinzena de dezembro e a primeira de janeiro (Figura 12). Na elaboração da imagem composição colorida, a imagem correspondente ao menor crescimento vegetativo (período de entrada de água na lavoura - primeira quinzena de novembro – primeira imagem de mínimo) foi alocada no canal verde. No canal azul foi colocada a imagem correspondente ao período de implementação da cultura (primeira quinzena de outubro – segunda imagem de mínimo) e no canal vermelho foi colocada a imagem correspondente ao período de maior crescimento vegetativo (primeira quinzena de janeiro – imagem de máximo). Para cada safra foram geradas três composições RGB deslocando-se em um e dois períodos as datas das imagens de máximos e mínimos NDVI.

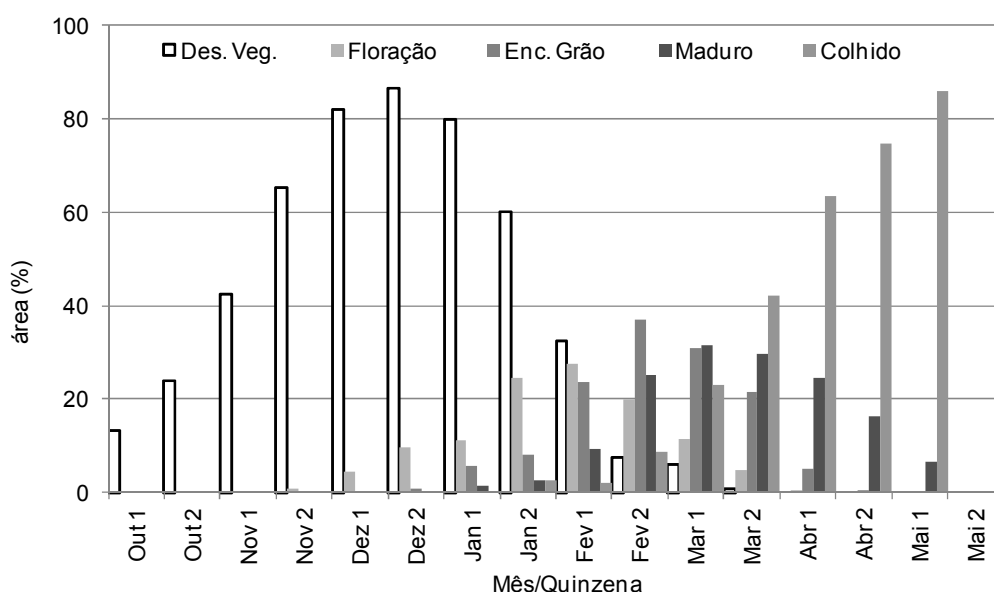


FIGURA 12. Calendário agrícola médio do arroz irrigado, safras 2000/01 a 2004/05, para o Estado do Rio Grande do Sul. Fonte dos dados: EMATER/RS.

O método de classificação digital supervisionada Paralelepípedo utiliza uma abordagem de classificação determinística, onde são identificados os valores mínimos e máximos dos histogramas das amostras em cada banda, que são usados para definir os vértices de um paralelepípedo no espaço de atributos. Deste modo, o *pixel* cujo valor se encontrar dentro desse paralelepípedo será classificado como pertencente à classe de interesse (Moreira, 2005). Neste trabalho foram selecionadas amostras em áreas com maior crescimento vegetativo dentro de cada composição RGB, às quais provavelmente estavam associadas a lavouras de arroz irrigado. A imagem classificada foi gerada tendo somente duas classes, sendo uma denominada “arroz” e outra “não arroz”. Em seguida selecionou-se apenas a classe “arroz”, que foi convertida em um arquivo vetorial, gerando assim uma máscara de cultura para cada composição RGB.

Para a obtenção da máscara final de cada safra foi feita a sobreposição das máscaras correspondentes às três composições RGB. A operação de sobreposição seguiu a seguinte regra: a primeira abrange a segunda exceto nos casos em que valor do *pixel* for zero, ou seja, houve um somatório cumulativo das máscaras.

3.4.2.2 Análise do mapeamento

A partir da geração das máscaras de cultivo, foram quantificadas as áreas cultivadas com arroz irrigado. Essas áreas foram comparadas com as áreas oficiais, fornecidas pelo IBGE, através da elaboração de um gráfico de dispersão (1:1), do índice de concordância de Willmott (d) e do coeficiente de correlação de Pearson (r).

Foram construídos mapas da distribuição espacial das áreas cultivadas com arroz irrigado para as safras de estudo. A partir da sobreposição dos mapas de todas as safras foi determinada a área potencial de cultivo do arroz irrigado para a região orizícola do Estado do Rio Grande do Sul.

Com o objetivo de se obter um indicativo da qualidade do mapeamento das áreas cultivadas com arroz irrigado, elaborado a partir da metodologia descrita no item anterior, avaliou-se a acurácia do mesmo na safra de 2005/06 utilizando-se como dado de referência um mapa temático previamente elaborado por Weber *et al.* (2007). Neste, mapa as áreas de arroz foram identificadas através de interpretação visual, de imagens do sensor TM do *Landsat-5*, para parte da região orizícola do Rio Grande do Sul. Os dados gerados a partir deste trabalho foram incorporados aos levantamentos oficiais divulgados pela CONAB naquele ano.

Primeiramente, o mapa de referência originalmente disponibilizado com resolução espacial de 30 metros, foi reamostrado para 250 metros em função de esta ser a resolução apresentada pelas imagens MODIS utilizadas no presente trabalho.

A avaliação da qualidade do mapeamento das áreas de arroz, para a safra 2005/06, foi elaborada a partir das medidas expressa pela matriz de confusão (Erros de Omissão, Erros de Inclusão e Exatidão Geral) e do Índice *Kappa* (K). Segundo diversos autores, o *Kappa* é um dos índices mais adequados para se comparar mapeamentos, pois além de avaliar a coincidência espacial expressa o grau de concordância entre os dados estimados e os dados de referência após a concordância ao acaso ser eliminada (Congalton & Grenn, 1999; Pontius, 2000; Rossiter, 2001).

As análises foram feitas em nível municipal considerando-se os 5 municípios de maiores áreas cultivadas com arroz nas regiões da Fronteira Oeste, Campanha e Depressão Central e que tiveram seu território totalmente coberto pelo mapa de referência. Adotou-se este critério em função do mapa de referência não cobrir toda a região orizícola do Rio Grande do Sul, dada a nebulosidade persistente em algumas áreas naquela safra.

3.4.3 Rendimento de grãos de arroz irrigado

3.4.3.1 Perfis temporais de NDVI/MODIS

As áreas cultivadas com arroz irrigado, nas diferentes regiões orizícolas foram caracterizadas por meio da evolução temporal do NDVI. Após a definição das máscaras de cultivo, foram extraídos os valores de NDVI mínimos, médios e máximos. Os valores médios foram utilizados para a construção dos perfis temporais das áreas cultivadas com arroz irrigado, das regiões e safras analisadas.

A média dos pixels que compõem as áreas com arroz irrigado em cada safra (2000/01 até 2009/10), foram utilizados para elaboração dos perfis temporais médios. Assim, procurou-se caracterizar a evolução temporal do NDVI da cultura, em cada uma das regiões orizícolas, e relacioná-las as principais etapas do ciclo da cultura. Com a finalidade de se verificar a variabilidade interanual do NDVI das áreas de arroz, nas diferentes regiões, foram assinalados nos perfis temporais médios os valores máximos e mínimos.

Foram analisados, também, os perfis temporais médios de NDVI das áreas cultivadas com arroz irrigado, nas seis regiões orizícolas, considerando-

se as safras de ocorrência do fenômeno ENOS, em suas fases fria (La Niña) e quente (El Niño) (Tabela 4). A partir dos perfis temporais médios das safras de ocorrência do fenômeno foram discutidos aspectos relacionados ao calendário agrícola e ao rendimento de grãos de arroz.

TABELA 4. Ocorrência de eventos ENOS (El Niño Oscilação Sul). Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte: NOAA, (2012).

Safras agrícolas	Ocorrência de ENOS - Tipo
2000/01	Sim - La Niña
2001/02	Não - ano neutro
2002/03	Sim - El Niño
2003/04	Não - ano neutro
2004/05	Sim - El Niño
2005/06	Não - ano neutro
2006/07	Sim - El Niño
2007/08	Sim - La Niña
2008/09	Não - ano neutro
2009/10	Sim - El Niño

Considerando-se o fato de que o NDVI é um indicador de biomassa verde, e que o acúmulo de biomassa está relacionado ao rendimento de grãos, testou-se ainda a existência de tendência embutida nas séries temporais de NDVI. Para as diferentes regiões orizícolas foram construídos gráficos da evolução temporal do NDVI abrangendo todo o período de estudo (safras 2000/01 até 2009/10). Para a verificação da tendência, foram ajustadas regressões lineares simples, nas quais o NDVI de cada região orizícola é a variável dependente e o tempo (safras) é a variável independente. A significância do coeficiente de inclinação da reta foi verificada pelo teste, a 5% de significância estatística.

Com o intuito de se identificar diferenças no calendário agrícola da cultura durante o período de estudo foram investigadas, também, as variações temporais de NDVI em nível mensal. A existência de tendência temporal foi

verificada usando o teste *t-Student* para o coeficiente de inclinação da reta de regressão linear ajustada, a 5% de significância estatística.

3.4.3.2 Correlações

3.4.3.2.1 Variáveis espectrais e os rendimentos de grãos de arroz irrigado

Para o estabelecimento das variáveis espectrais que mais influenciam os rendimentos de grãos de arroz irrigado nas regiões orizícolas, foram calculados as correlações entre os valores de NDVI e os rendimentos de grãos da cultura. Assim, buscou-se definir os melhores indicadores espectrais para comporem os modelos de estimativa do rendimento da cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

Foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os dados de NDVI e os rendimentos de grãos oficiais da cultura. Foram analisados os valores de dezesseis dias, os valores mensais e a integração dos valores de NDVI durante o período de crescimento (integração do NDVI entre os valores máximos e mínimos).

As correlações foram calculadas através da utilização do software SPSS versão 18.0.

3.4.3.2.2 Variáveis meteorológicas e os rendimentos de grãos de arroz irrigado

Primeiramente, os dados meteorológicos diários foram agrupados em períodos de dezesseis dias correspondentes aos dias utilizados na composição das imagens NDVI/MODIS (Tabela 5).

TABELA 5. Período de dezesseis dias considerado para o agrupamento dos dados meteorológicos.

Mês		Período correspondente*
Setembro	1	28 agosto – 12 setembro
	2	13 setembro – 28 setembro
Outubro	1	29 setembro – 14 outubro
	2	15 outubro – 30 outubro
Novembro	1	31 outubro – 15 novembro
	2	16 novembro – 01 dezembro
Dezembro	1	02 dezembro – 17 dezembro
	2	18 dezembro – 31 dezembro
Janeiro	1	01 janeiro – 16 janeiro
	2	17 janeiro – 01 fevereiro
Fevereiro	1	02 fevereiro – 17 fevereiro
	2	18 fevereiro – 04 março
Março	1	05 março – 20 março
	2	21 março – 05 abril
Abril	1	06 abril – 21 abril
	2	22 abril – 07 maio

* Período correspondente ao utilizado para as composições de dezesseis dias no produto MODIS MOD13Q1.

Com os dados diários de temperatura mínima foram calculados o número de dias com temperatura mínima menor ou igual a 15°C (ND $T_{min} \leq 15^\circ\text{C}$), em cada região e período analisado.

Foram analisados os coeficientes de correlação de Pearson entre o rendimento de grãos corrigido (sem tendência tecnológica) e os dados agrometeorológicos (radiação solar global, temperatura mínima absoluta do ar e número de dias com temperatura mínima do ar menor ou igual a 15°C) do período de dezesseis dias, e do período mensal. As significâncias das correlações foram testadas através do teste *t-Student* (1%, 5% e 10%).

Foi utilizado o rendimento de grãos corrigido, pois se buscou explicar a variabilidade da série de rendimentos corrigidos em função das condições meteorológicas ocorridas no período.

3.4.3.3 Ajuste dos modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado

Modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento foram elaborados para as regiões orizícolas e para o conjunto delas (metade sul do Estado do Rio Grande do Sul), sendo este último considerado como sendo o modelo para o Estado. Os modelos foram ajustados através de equações de regressão linear múltipla com k variáveis independentes (Equação 7).

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ij} + \varepsilon_j \quad (7)$$

Sendo Y_i é o valor do rendimento de grãos ($t \text{ ha}^{-1}$), β_0 é o coeficiente linear ($t \text{ ha}^{-1}$), β_i é o coeficiente de regressão das variáveis independentes ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), X_i , X_{ij} são as variáveis independentes X_i na observação j e ε_j é o erro associado à variável Y na observação j ($t \text{ ha}^{-1}$).

Para o ajuste dos modelos, através da Equação 7, pressupõe-se que a variável dependente Y_i é a função linear das variáveis independentes; os valores das variáveis independentes são fixos; e os erros têm média zero, são homocedásticos, independentes e de distribuição normal (Draper & Smith, 1996; Souza, 1998).

Foram ajustados dois modelos para cada região orizícola e para o Estado como um todo, tendo sido utilizadas duas abordagens.

Na primeira abordagem, os parâmetros do modelo das equações de regressão linear múltipla foram estimados pelo método “passo a passo”

(*stepwise*) com 5% de significância para entrada e 20% para a saída de variáveis. A variável dependente foi o rendimento de grãos e as variáveis independentes foram todas as variáveis espectrais e agrometeorológicas referentes às composições de dezesseis dias do período de setembro a abril. A escolha dos modelos mais adequados, gerados a partir desta abordagem, foi feita a partir da significância dos coeficientes de determinação (R^2).

Na segunda abordagem foram elaborados modelos, também a partir de regressão linear múltipla onde o rendimento de grãos é a variável dependente, no entanto, as variáveis independentes (agrometeorológicas e espectrais) foram previamente definidas. As variáveis independentes, nesta abordagem, foram aquelas que apresentaram os maiores coeficientes de correlação, mas foi considerado, também, a efetiva relação da variável com o rendimento de grãos de acordo com a revisão bibliográfica. Procedeu-se dessa forma com o intuito de evitar a inclusão de variáveis que apresentem correlações espúrias com os rendimentos, ou seja, não contribuam efetivamente para a definição destes, mas incluídas no modelo por mero acaso, dado o conjunto de dados.

Do ajuste dos modelos para o Estado como um todo foram excluídos dados referentes a duas safras de cada região orizícola, escolhidos de forma aleatória, os quais foram utilizadas para teste de aplicação dos modelos. As significâncias dos coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os rendimentos de grãos estimados pelos diferentes modelos e os rendimentos oficiais foram verificadas através do teste *t-Student*.

O ajuste dos modelos foi realizado através da utilização do software SPSS versão 18.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatísticas agrícolas

4.1.1 Área cultivada

A área semeada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Figura 13a) apresentou grande variabilidade entre as safras estudadas. Em média, neste período, foram semeados 1.017.590 ha, com coeficiente de variação de 6,1% (Tabela 6) e diferença de 170.153 ha entre os valores máximos (1.106.693 ha em 2009/10) e os valores mínimos (936.540 ha na safra de 2006/07). É importante ressaltar que na safra agrícola de 2003/04 foi semeada, pela primeira vez no Estado, uma área superior a um milhão de hectares (1.048.177 ha). Mesmo com os decréscimos nos valores de área semeada observados nas safras de 2000/01, 2002/03 e 2006/07, foi constatada tendência estatisticamente significativa de aumento da área semeada pelo teste *t-Student* a 5% de probabilidade.

Quando se analisou as regiões orizícolas separadamente (Figura 13b) percebeu-se que as maiores áreas semeadas foram registradas na Fronteira Oeste (média de 284.100 ha) e as menores áreas nas regiões das Planícies Externa e Interna (120.313 e 126.950 ha). O menor coeficiente de variação foi observado na região da Depressão Central (3,8%) e o maior na Planície Interna (10,2%).

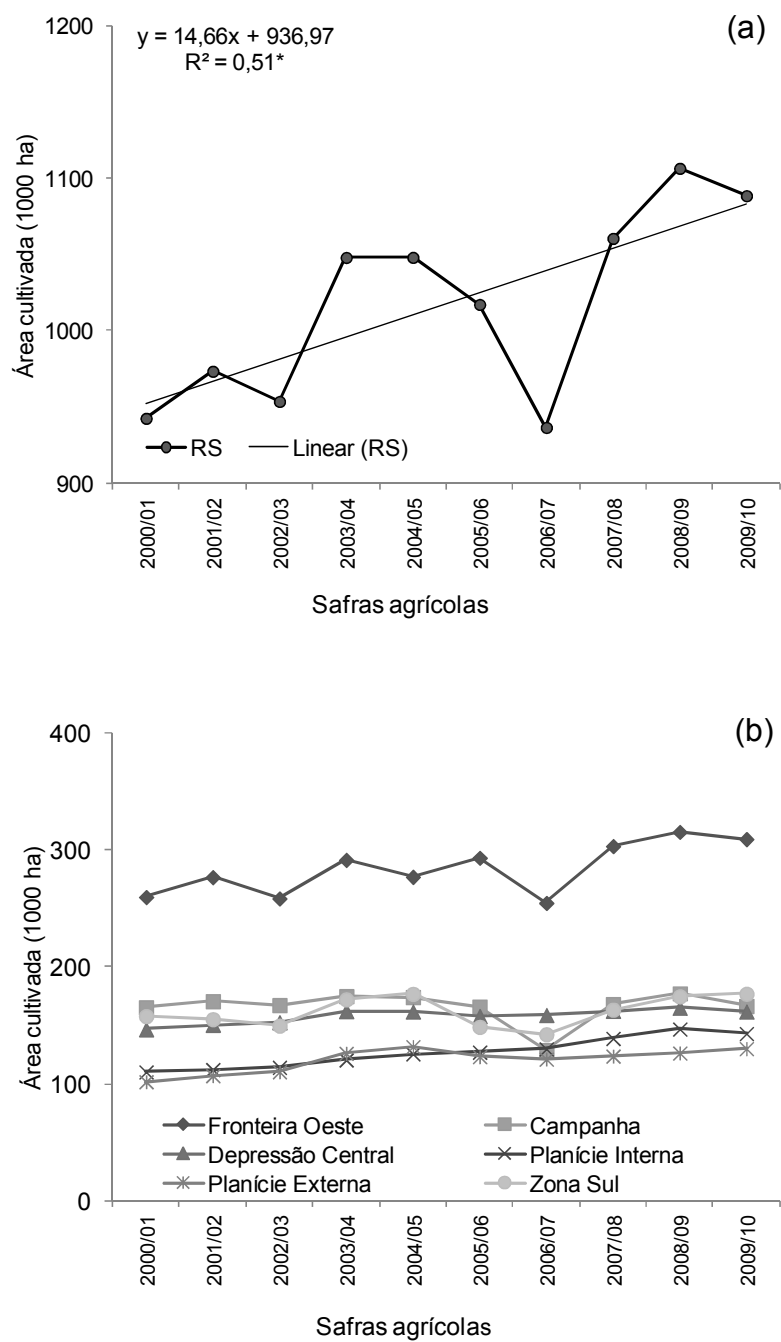


FIGURA 13. Área semeada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul (a) e (b) nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul (ha). Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010). * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste *t-Student*.

TABELA 6. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação da área semeada com grãos de arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas e no Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2010).

Região	Área semeada (mil ha)		
	Média	Desvio-Padrão	CV (%)
Fronteira Oeste	284,1	22,0	7,7
Campanha	166,1	13,7	8,2
Depressão Central	158,1	6,0	3,8
Planície Interna	126,9	12,9	10,2
Planície Externa	120,3	10,2	8,5
Zona Sul	162,0	12,9	7,9
Média RS	1017,6	62,3	6,1

É importante ressaltar que, segundo o último censo das lavouras de arroz irrigado no Rio Grande do Sul divulgado pelo IRGA em 2006, o tamanho médio das lavouras foi de 114,57 ha, havendo muitas diferenças entre as regiões orizícolas. A Zona Sul apresentou tamanho médio de lavoura de 285,45 ha; seguida pela Fronteira Oeste, com 250,04 ha e pela Campanha, com 153,88 ha. A Depressão Central, por outro lado, foi a região com menor área média, 47,29 ha, seguida pela Planície Costeira Externa, com 87,61 ha e pela Planície Costeira Interna, com 94,86 ha.

A análise das estatísticas quanto à área colhida (Figura 14a e 14b) de arroz irrigado foi semelhante à área semeada, apresentando tendência de aumento durante o período de estudo (significativa estatisticamente pelo teste *t-Student* a 10% de probabilidade).

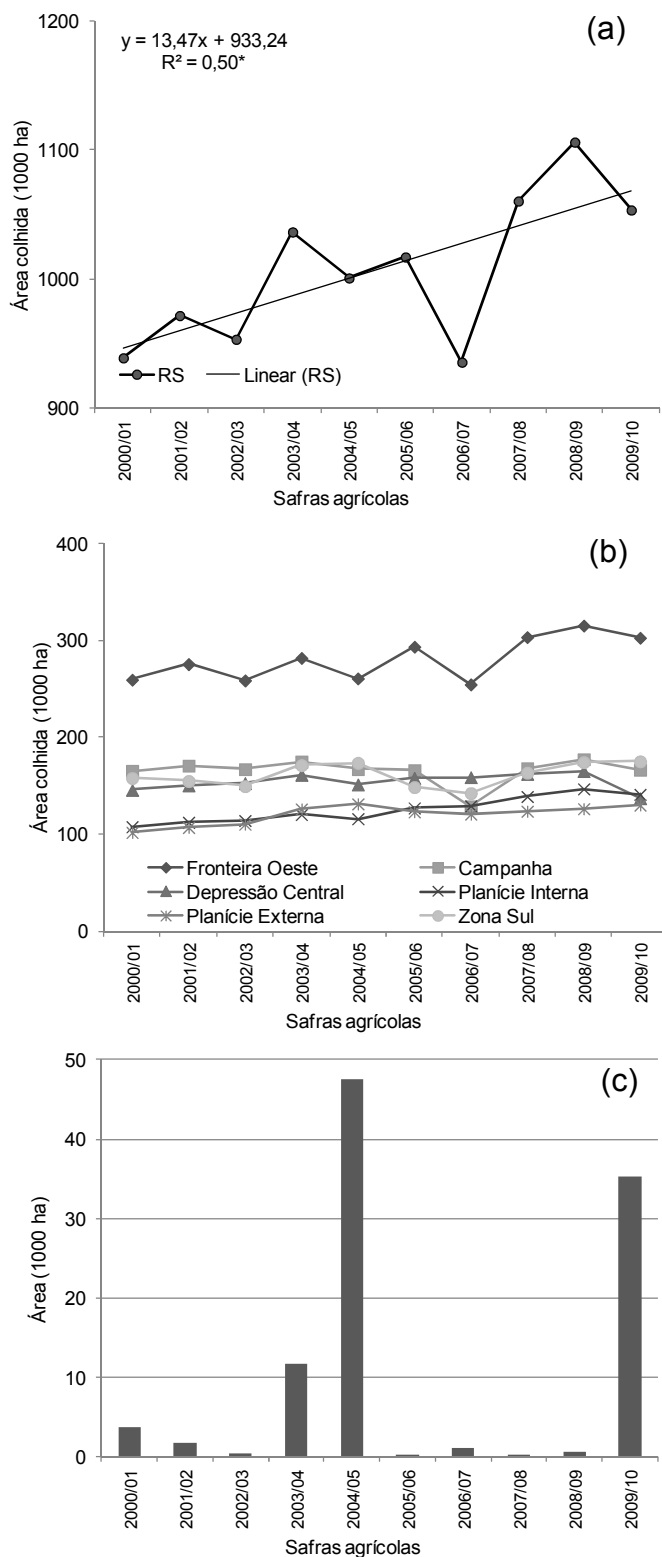


FIGURA 14. Área colhida de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (a), nas diferentes regiões orizícolas (b) e; diferença entre área semeada e área colhida (c). Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2010).* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste *t-Student*.

Considerando os dados para o Rio Grande do Sul, a área colhida média foi de 1.007.329 ha com um coeficiente de variação de 5,7% (Tabela 7). O valor máximo ocorreu na safra 2008/09 quando foram colhidos cerca de 1.106.080 ha, dos quais 29% na região orizícola da Fronteira Oeste, 16% na Campanha, 15% na Depressão Central, 13% na Planície Interna, 11% na Planície Interna e 16% na Zona Sul. Novamente, o menor coeficiente de variação foi observado na Depressão Central e o maior na Planície Interna.

TABELA 7. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação da área colhida com grãos de arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas e no Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados IBGE/LSPA (2012).

Região	Área colhida (mil ha)		
	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Fronteira Oeste	280,6	22,1	7,9
Campanha	165,4	13,4	8,1
Depressão Central	154,4	8,6	5,6
Planície Interna	125,5	13,5	10,7
Planície Externa	120,2	10,1	8,4
Zona Sul	161,3	12,1	7,5
Média RS	1.007,3	57,5	5,7

A diferença entre a área semeada e a área colhida é uma informação simples, mas que relacionada às condições meteorológicas ao calendário agrícola pode auxiliar na caracterização de quebras de safras (Junges, 2011).

No período analisado a maior diferença ocorreu na safra de 2004/05 (Figura 14c), quando, deixaram de ser colhidos no Estado aproximadamente 47.450 ha, dos quais cerca de 34% estavam localizados na região orizícola da Fronteira Oeste, 22% na Depressão Central, 20% na Planície Interna, 15% na Campanha, 7% na Zona Sul e apenas 1% na Planície Externa.

Cabe ressaltar ainda que, no ano agrícola de 2004/05 o Rio Grande do Sul registrou uma das maiores quebras de safras de sua história, causada em função de uma estiagem severa onde os totais pluviométricos registrados no verão (dezembro de 2004 e janeiro, fevereiro de 2005) foram menores que os registrados nos 53 anos anteriores. A quebra total das principais culturas de primavera-verão não irrigadas (soja, milho e feijão) foi da ordem de 8,5 milhões de toneladas de grãos, o que causou uma redução média de 66 % em relação à expectativa do início do ano agrícola (Berlato & Cordeiro, 2005). Em valores, a perda direta foi de cerca de 1,52 bilhão de dólares.

Já na safra de 2009/10 a diferença considerável entre área colhida e semeada se deu em função da precipitação intensa ocorrida durante o período indicado como preferencial para a implantação da cultura (CONAB, 2012b). A região orizícola mais prejudicada foi a Depressão Central, onde deixaram de ser colhidos, em torno de 24.760 ha, o que representou 70% do total da redução no Estado (35.300 ha). Nesta região, somente no mês de novembro de 2009 foi registrado, segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia, um total pluviométrico de 480 mm, o que equivale a mais do que o triplo da normal climatológica deste mês.

A produção esperada de grãos de arroz irrigado para o Rio Grande do Sul, na referida safra, era de 7.269.100 t, no entanto, devido essa redução de área houve uma quebra de 6,5% em relação à expectativa inicial.

4.1.2 Produção

A quantidade produzida de grãos de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul apresentou tendência de incremento durante o período a analisado (significativa estatisticamente pelo teste *t-Student* a 10% de

probabilidade - Figura 15a). Essa tendência pode ser atribuída à adoção de novas cultivares, adaptadas às condições de solo e clima da região e com características de grãos específicas que atendem as exigências de mercado, tudo aliado a um adequado manejo da cultura pelo produtor gaúcho (D'arco, 2007).

A maior produção de arroz irrigado no Estado, durante o período de estudo, foi registrada na safra de 2008/09 (7.966.812 t) e, a menor, em 2002/03 (4.674.908 t), sendo em média de 6.244.571 t e apresentando um coeficiente de variação de 15,1% (Tabela 8).

Analisando-se as regiões orizícolas separadamente percebe-se que, em média, a região da Fronteira Oeste foi responsável por cerca de 30% do total produzido, a Campanha por 17%, as regiões da Depressão Central e da Zona Sul por 15% cada, e as Planícies Interna e Externa por 12% e 11% respectivamente (Figura 15b).

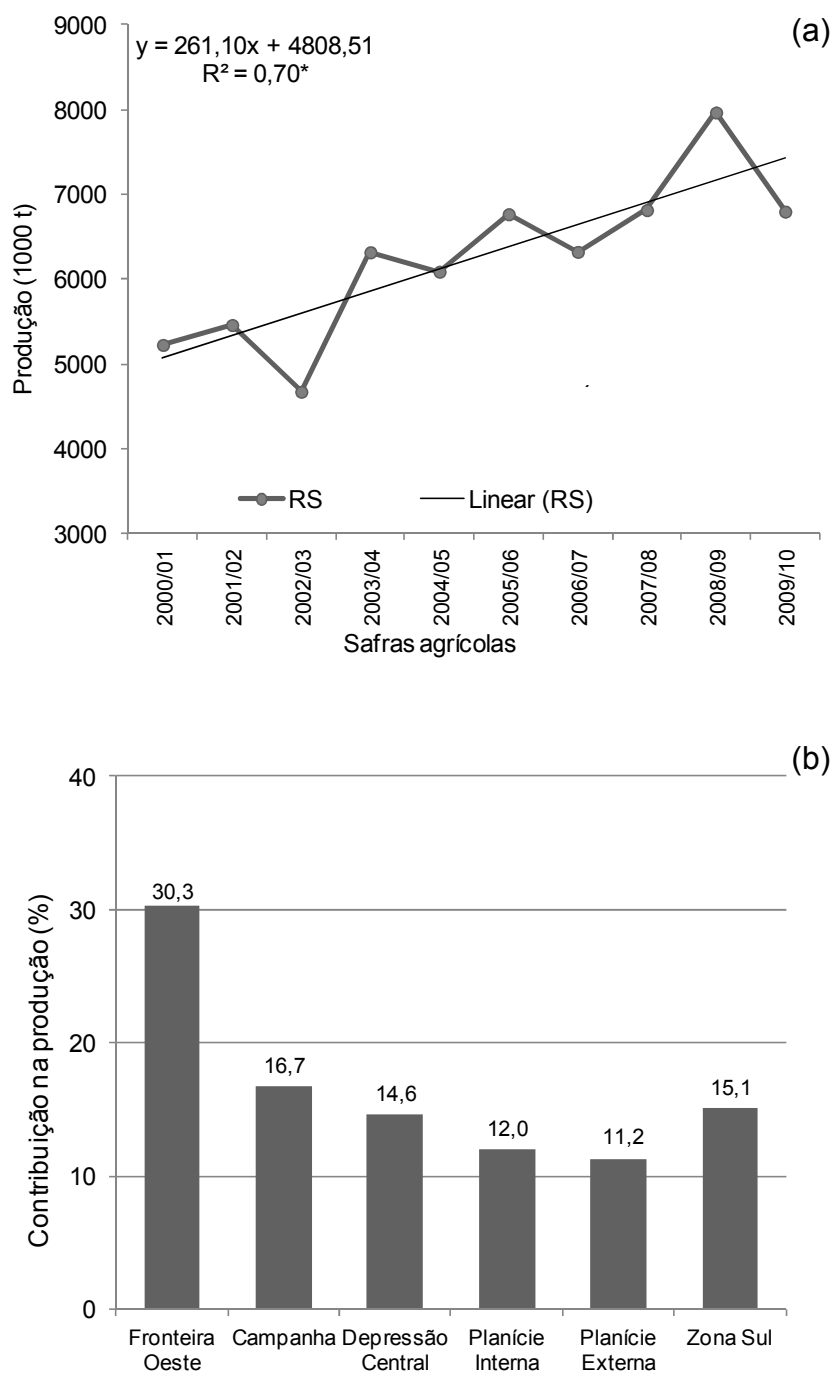


FIGURA 15. Produção de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (a); Contribuição percentual média relacionada à produção de cada região orizícola do Estado (b). Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).* Significativo a 10% de probabilidade pelo teste *t-Student*.

TABELA 8. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação da produção de grãos de arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas e no Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).

Região	Produção (mil t)		
	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Fronteira Oeste	1.897,6	332,0	17,5
Campanha	1.040,7	147,3	14,2
Depressão Central	909,7	142,1	15,6
Planície Interna	755,2	159,5	21,1
Planície Externa	703,9	144,2	20,5
Zona Sul	937,5	176,9	18,9
Média RS	6.244,6	944,1	15,1

A variabilidade da produção e, conseqüentemente, dos rendimentos de grãos no Rio Grande do Sul ao longo dos anos é causada fundamentalmente pelas condições climáticas (Berlato & Fontana, 2003). As culturas da soja e do milho, de grande representatividade socioeconômica para o e Estado, são conduzidas, praticamente, sem irrigação condicionando fortemente a variabilidade de seus rendimentos à ocorrência de precipitação pluvial. Já a cultura do arroz é conduzida no Rio Grande do Sul, em sua totalidade, utilizando o sistema de irrigação por inundação fazendo com que seus rendimentos apresentem menor variabilidade e estejam atrelados, segundo Steinmetz (2004), às ocorrências de baixas temperaturas e disponibilidade de radiação solar, durante as fases críticas do desenvolvimento da cultura.

4.1.3 Rendimento de grãos de arroz irrigado

As regiões que apresentaram os rendimentos médios mais altos foram a Fronteira Oeste e a Campanha, enquanto que, os rendimentos médios mais baixos foram observados na Planície Externa, apresentando coeficientes de

variação de, respectivamente, 11,8%, 11,9% e 14% (Tabela 9). Essas regiões são coerentes com as que apresentaram, também, os maiores e menores valores de área cultivada e produção. O rendimento médio, observado no Rio Grande do Sul durante o período de estudo, foi de 6,1 t ha⁻¹ com um coeficiente de variação de 11,6%.

TABELA 9. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação do rendimento de grãos de arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas e no Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).

Região	Rendimento de grãos		
	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Fronteira Oeste	6,7	0,8	11,8
Campanha	6,3	0,8	11,9
Depressão Central	6,0	0,7	12,6
Planície Interna	6,0	0,7	11,1
Planície Externa	5,8	0,9	14,9
Zona Sul	6,0	0,8	13,9
Média RS	6,1	0,7	11,6

Para a modelagem do rendimento, busca-se apontar indicadores que expliquem a variabilidade do rendimento, sendo, em geral, necessária a retirada da tendência tecnológica o que nada mais é que o estudo de tendência temporal. O termo tendência tecnológica refere-se a aumentos anuais significativos no rendimento de grãos, que são decorrentes do uso de novas tecnologias tais como o uso de variedades mais produtivas, insumos modernos e novas técnicas de manejo de planta, solo e água (Braga, 1995; Carmona, 2001).

Neste trabalho, todas as regiões orizícolas e também o Estado do Rio Grande do Sul, no período de 2000 a 2010, apresentaram tendências tecnológicas crescentes embutidas no rendimento (coeficiente de regressão

linear significativo a 10% de probabilidade pelo teste *t-Student*) (Figura 16). As regiões da Depressão Central ($\beta_1 = 0,16 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), Planície Interna ($\beta_1 = 0,16 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e Campanha ($\beta_1 = 0,17 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foram as que apresentaram os menores incrementos. Planície Externa ($\beta_1 = 0,21 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), Fronteira Oeste ($\beta_1 = 0,20 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) as regiões que apresentaram níveis intermediários e a que apresentou o maior nível tecnológico foi a Zona Sul ($\beta_1 = 0,24 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

A tendência temporal, para o rendimento de arroz irrigado no Estado (Figura 16), mostrou aumento de $0,19 \text{ t ha}^{-1}$ a cada ano, nos rendimentos do período avaliado, fato que pode ser explicado, em parte, pela adoção de novas tecnologias no sistema de produção da cultura, como o uso de novas cultivares e insumos, assim como de manejos mais eficientes, entre outros.

O coeficiente de determinação (R^2) da equação ajustada para o Estado (Figura 17) mostra que a tendência temporal de aumento embutida na série de rendimento foi responsável por aproximadamente 70% da variabilidade do mesmo. Considerando-se que as séries temporais das variáveis meteorológicas que contribuem significativamente para a definição dos rendimentos sejam estacionárias (Apêndice 1), pode-se assumir que após a retirada da tendência tecnológica, as variações interanuais no rendimento de grãos de arroz estão associadas às variações nas condições ambientais. Estas deverão explicar o restante da variabilidade dos rendimentos da cultura.

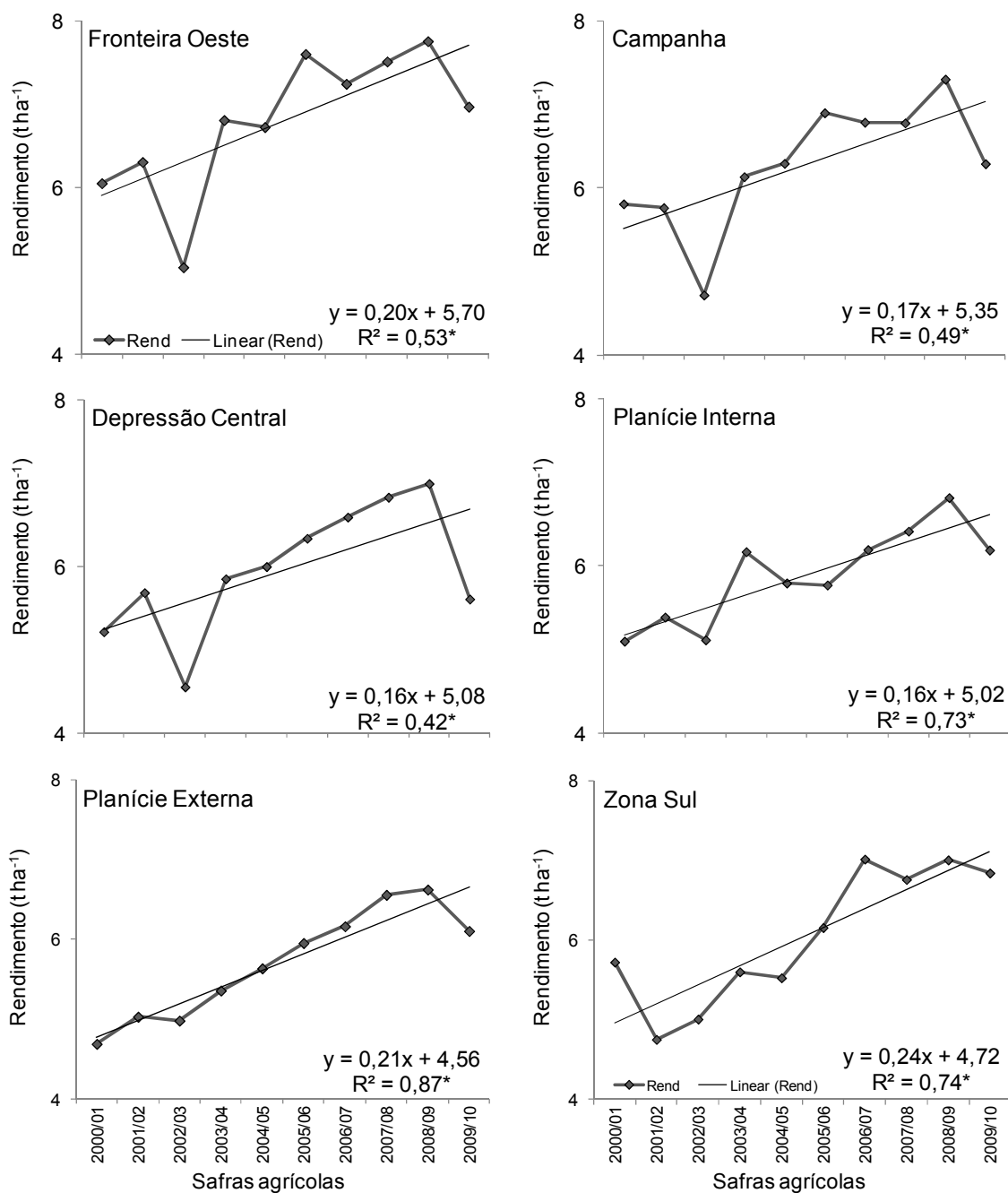


FIGURA 16. Tendência temporal do rendimento de arroz irrigado para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012). * Significativo a 10% de probabilidade pelo teste *t-Student*.

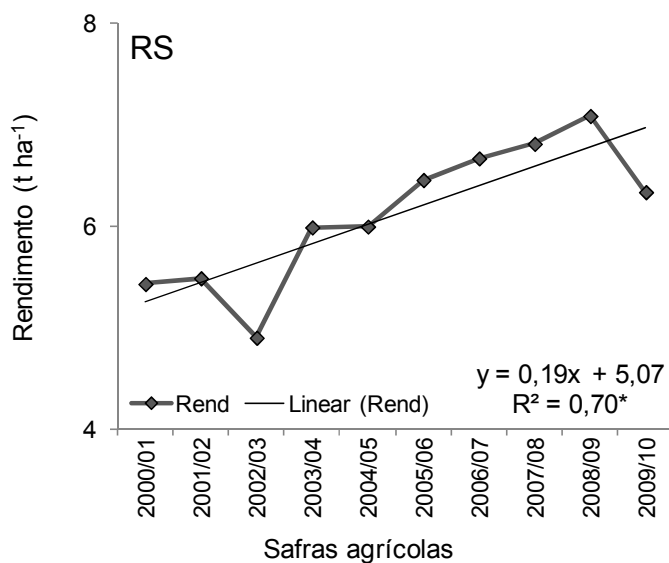


FIGURA 17. Tendência temporal do rendimento de arroz irrigado para as o Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012). * Significativo a 10% de probabilidade pelo teste *t-Student*.

Para a série analisada, as condições ambientais, em razão principalmente das condições meteorológicas e de manejo da cultura, determinaram uma flutuação de -0,74 a +0,31 t ha⁻¹ (Figura 18). É importante ressaltar que, a separação dos efeitos ocasionados por uma ou outra causa de variação não são possíveis de identificação na análise feita neste trabalho.

Nas Figuras 18 e 19 são apresentadas as séries de rendimento do arroz irrigado para as diferentes regiões orizícolas e para o Rio Grande do Sul após a retirada da tendência tecnológica. Observa-se de forma mais evidente que, em geral, houve coincidência entre os rendimentos da cultura num dado ano entre as regiões.

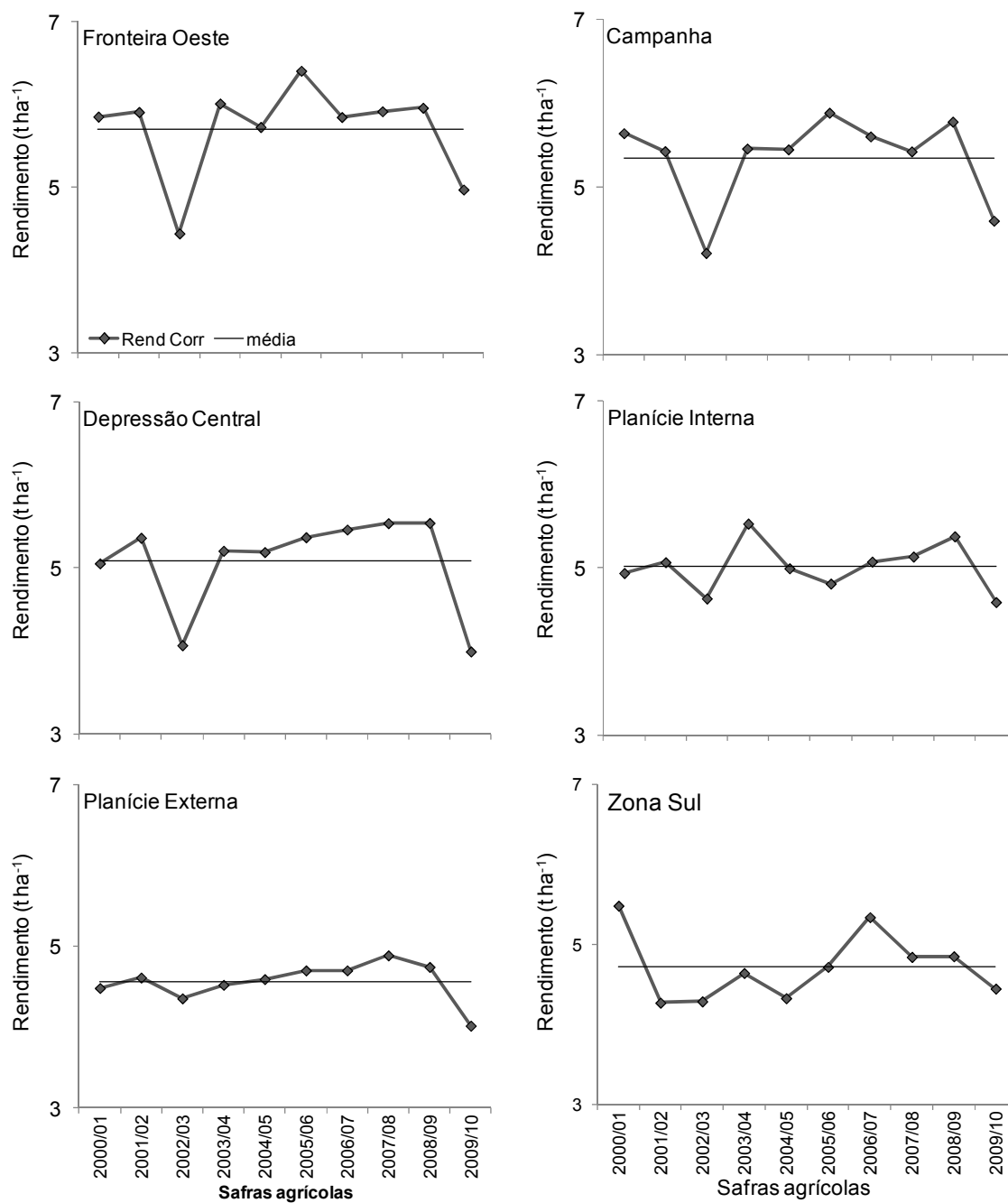


FIGURA 18. Rendimento corrigido (sem tendência temporal) de arroz irrigado para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).

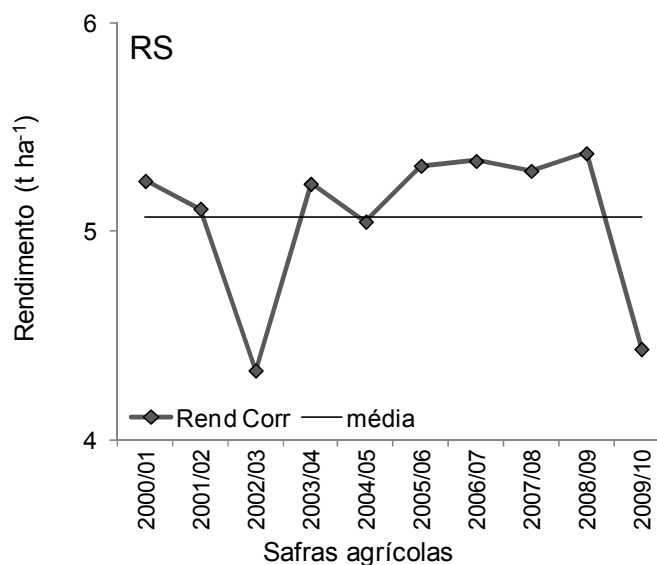


FIGURA 19. Rendimento corrigido (sem tendência temporal) de arroz irrigado para as o Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).

Pode-se destacar que em alguns anos agrícolas, como o de 2006/07 e 2008/09 foram observados rendimentos acima da média em todas as regiões. Em contraste, 2002/03 e 2009/10 foram anos agrícolas de baixos rendimentos também em todas as regiões. Este comportamento evidencia o fato de que o rendimento do arroz irrigado no Estado está altamente associado a eventos de escala regional, ou seja, nestas séries de dados a variabilidade interanual está expressando a influência de fatores não controláveis pelo agricultor, especialmente àqueles associados aos elementos meteorológicos. Um bom exemplo da influência dos elementos meteorológicos no rendimento de arroz irrigado para o Estado são as ocorrências dos eventos ENOS (El Niño Oscilação Sul). Berlato & Fontana (2003) mostram que há tendência de eventos El Niño prejudicarem o rendimento e eventos La Niña serem favoráveis, como pôde ser observado nas safras 2002/03 (El Niño) e 2007/08 (La Niña).

4.2 Estimativa da área cultivada com arroz irrigado a partir de imagens MODIS

4.2.1 Quantificação e espacialização das áreas cultivadas com arroz irrigado

A definição da área de cultivo, embora seja apenas um passo intermediário do trabalho, é muito importante, pois define a área a ser utilizada para a extração dos valores espectrais das lavouras de arroz e, portanto, para a obtenção dos modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos.

Na Figura 20 é apresentada a comparação entre a estimativa oficial de área de cultivo de arroz e a área determinada a partir das composições em RGB de imagens de NDVI para as seis regiões orizícolas nas dez safras agrícolas analisadas. O índice de concordância de Willmott (d), que mede a dispersão dos dados em relação à reta (1:1), mostrou que a exatidão dos valores de área de cultivo estimados em relação aos oficiais foi de 0,95. A confiabilidade da metodologia também pode ser verificada pelo coeficiente de correlação de Pearson, o qual foi significativo a 1% de probabilidade, pelo teste *t-Student*, com o valor de 0,90.

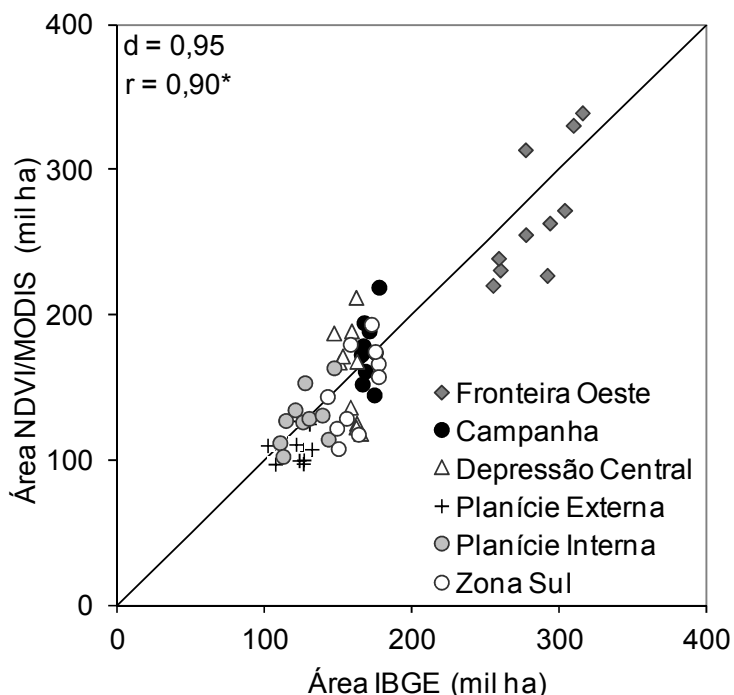


FIGURA 20. Relação entre a área cultivada com arroz irrigado nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, estimada através de composições em RGB de NDVI (Área NDVI/MODIS) e a área oficial fornecida pelo IBGE (Área IBGE). Período: 2000/01 a 2009/10. * Significativo a 1% de probabilidade pelo teste *t-Student*.

Na Tabela 10 nota-se que os maiores desvios médios das áreas estimadas através do NDVI em relação às áreas fornecidas pelo IBGE ocorreram nas regiões da Planície Externa (-11,1%), Depressão Central (5%), Planície Interna (-3,5%) e Zona Sul (-3,5%). Os menores desvios ocorreram nas regiões da Campanha e da Fronteira Oeste, sendo de, respectivamente 2,2% e -3,1%. Estes resultados são promissores visto que as menores diferenças ocorreram nas regiões de maior área cultivada no Estado, mas diferem dos encontrados por D'arco (2007). Naquele trabalho o autor propôs determinar as áreas cultivadas com arroz irrigado, no Rio Grande do Sul, através da classificação automática *Isoseg* de composições multitemporais, de imagens MODIS, do índice de vegetação EVI. Os resultados mostraram que

ocorreram superestimativas em municípios localizados nas regiões com maiores áreas cultivadas (Fronteira Oeste e Campanha) e subestimativas em municípios das regiões com menores áreas cultivadas (Planícies Interna e Externa).

TABELA 10. Área média cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul estimada através de imagens NDVI/MODIS, dados oficiais (IBGE) e desvios médios (%). Período 2000/01 a 2009/10.

Região	Área de cultivo (mil ha)		
	MODIS	IBGE	Desvios (%)
Fronteira Oeste	269,2	277,6	-3,1
Campanha	169,4	165,8	2,2
Depressão Central	159,8	152,1	5,1
Planície Interna	149,2	154,6	-3,5
Planície Externa	108,6	122,2	-11,1
Zona Sul	149,2	159,6	-3,5
RS	1005,5	1052,	-4,5

O desvio médio observado quando se considerou o Estado como um todo foi de -4,5%. Essa tendência de subestimativa das áreas cultivadas com arroz irrigado, no Rio Grande do Sul, utilizando imagens de satélite também foi observado por Weber *et al.* (2007). Naquele trabalho, foram utilizadas imagens *Landsat-5*, provenientes do sensor TM, para estimar a área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul na safra agrícola de 2005/06. O mapeamento foi elaborado a partir da interpretação visual de imagens de duas datas distintas, uma antes da implantação das lavouras e outra no pleno desenvolvimento da cultura. Os critérios utilizados para tal interpretação estavam relacionados ao comportamento espectral, à forma, textura, posição no relevo, entre outros. Cabe destacar que naquele trabalho, não foi possível mapear toda a área cultivada com arroz no Estado, em função da presença de nuvens nas regiões

próximas ao litoral durante a safra de estudo. A utilização de imagens com melhor resolução temporal, como é o caso das imagens MODIS, torna-se uma vantagem, pois em grande parte os problemas relacionados à contaminação de nuvens são minimizados.

É importante ressaltar, ainda, que as análises oficiais são elaboradas a partir de aspectos regionais, onde são incluídas características distintas de solo, manejo e tratos culturais, de tamanho das lavouras, ou mesmo de diferenças entre as equipes responsáveis pelo levantamento estatístico do arroz, e isto pode ter influência nos resultados oficiais (IBGE) das estimativas da área plantada.

Na Figura 21 são apresentadas as distribuições espaciais das áreas cultivadas com arroz irrigado, estimadas a partir das imagens NDVI/MODIS, para as safras de 2006/07 e de 2009/10. Estas safras foram tomadas como exemplo visto que apresentaram no período de análise as maiores e menores áreas cultivadas, respectivamente. Na safra de 2006/07 a área cultivada com arroz irrigado estimada através das imagens NDVI/MODIS foi de 900.232 ha enquanto que a área oficial foi de 936.540 ha (subestimativa de 36.308 ha). Já na safra de 2009/10 observou-se uma superestimativa de 29.416 ha sendo a área estimada de 1.118.144 ha e a área oficial de 1.088.728 ha. Apesar das diferenças, verificou-se consistência quanto à distribuição espacial em ambas as safras avaliadas.

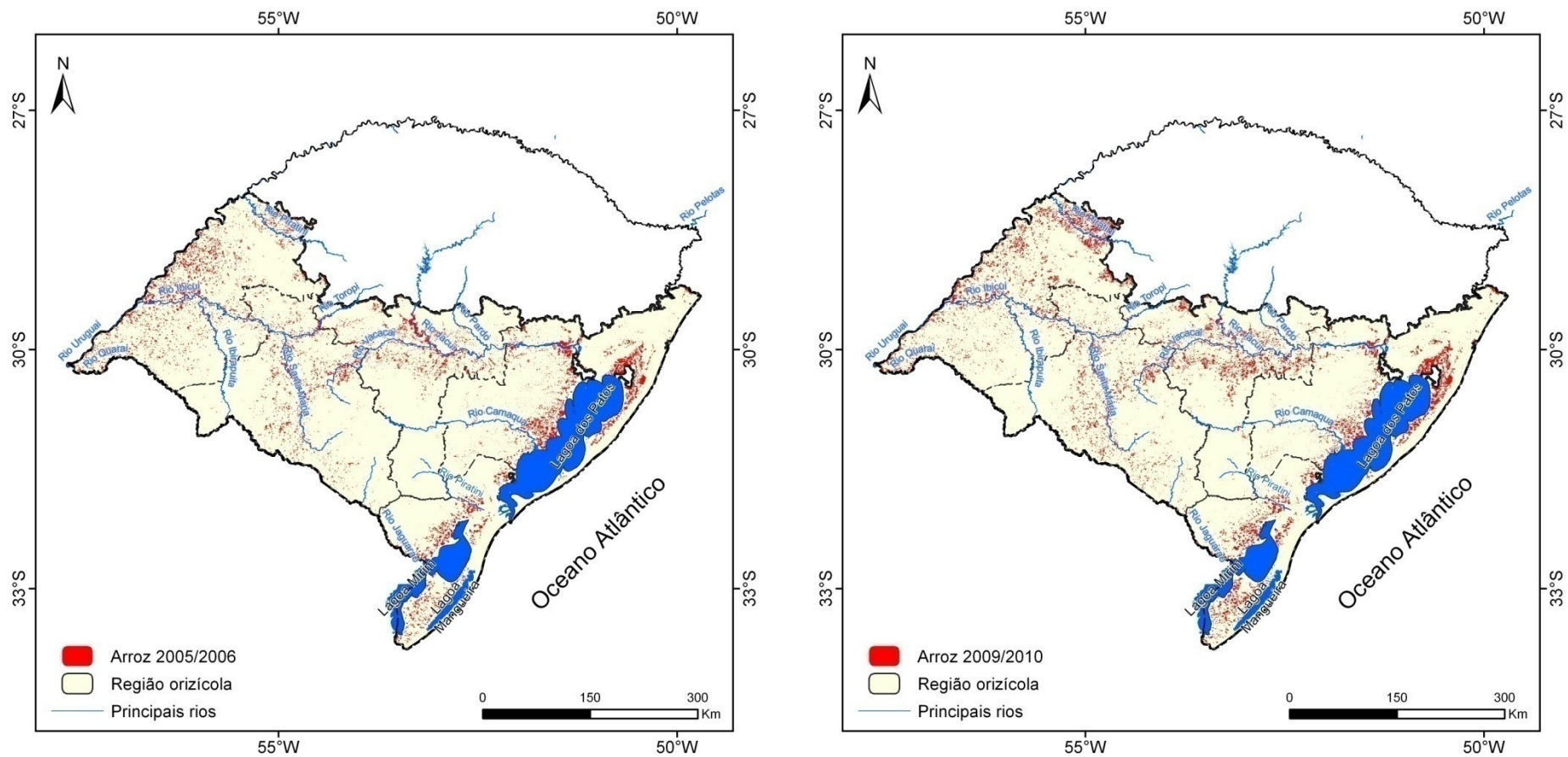


FIGURA 21. Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, na região orizícola do Rio Grande do Sul durante as safras de 2006/07 e 2009/10.

A máscara de cultivo indicou que, devido à característica da cultura de ser conduzida sob irrigação, as lavouras estão distribuídas próximas a corpos d'água. Nas regiões Planícies Interna, Externa e Zona Sul destacam-se as áreas cultivadas próximas as Lagoas dos Patos, Mirim e Mangueira. Na Fronteira Oeste há predomínio das lavouras nas regiões circundantes aos Rios Uruguai, Piratini e Ibicuí. Também se destacam áreas cultivadas próximas aos Rios Jacuí, Vacacaí e Camaquã na região orizícola Depressão Central. Já na Campanha não se percebeu um padrão claro de distribuição das lavouras em torno dos principais rios da região, o que pode ser atribuído ao fato de que, aproximadamente, 77% da água utilizada para irrigação nesta região é proveniente de açudes e barragens (IRGA, 2006).

Quanto à distribuição espacial observa-se, também, que as lavouras apresentam localização variável a cada safra, o que pode ser justificado pela adoção do sistema de pousio e rotação de culturas que é, em média, de dois anos (Reis & Saibro, 2004). Na Figura 22 são apresentadas duas imagens NDVI/MODIS, de uma área próxima a Lagoa Mirim na região orizícola da Zona Sul, referentes às safras 2007/08 e 2009/10, com as lavouras de arroz destacadas em verde e vermelho respectivamente. Pode-se perceber através desse exemplo que, nas diferentes safras, embora as lavouras tenham sido implantadas próximas sofreram deslocamentos espaciais, caracterizando assim o sistema de pousio ou rotação de culturas.

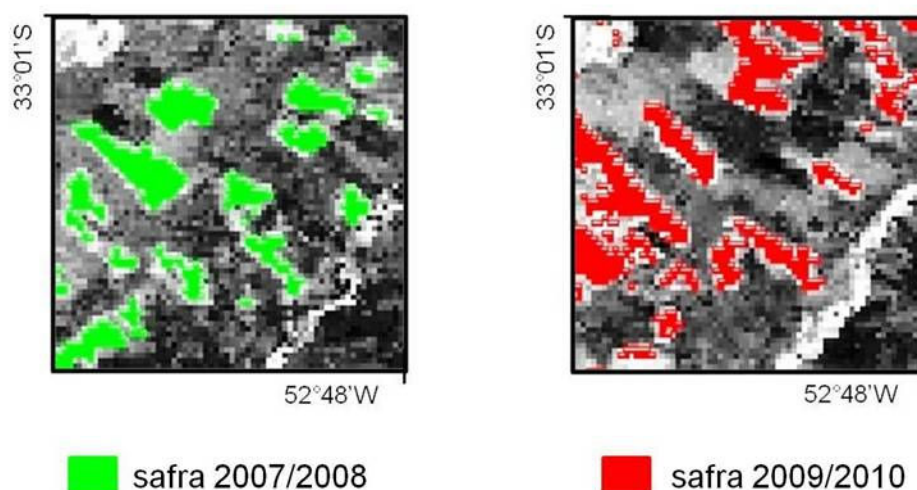


FIGURA 22. Recorte de imagens NDVI/MODIS, de área localizada na região orizícola da Zona Sul, com as lavouras cultivadas com arroz irrigado em destaque, nas safras de 2007/08 e 2009/10.

A visão sinóptica proporcionada pelas imagens de sensoriamento remoto permite, além de quantificar as áreas cultivadas com arroz, extrair informações relacionadas às dinâmicas espaço-temporal das lavouras, ao consumo de água e ao potencial de expansão das mesmas. As informações relacionadas à espacialização das áreas cultivadas possibilitam a determinação de características regionais da cultura, tais como tamanho médio dos talhões e rotação das áreas de plantio, permitindo assim, o desenvolvimento de políticas públicas voltadas diretamente ao setor arroseiro, tais como crédito rural, políticas de irrigação e de manejo sustentável do meio-ambiente (D'arco, 2007).

Em tese, culturas agrícolas apresentam comportamentos espectrais distintos, devido as diferentes interações entre a REM e os cultivos. Segundo Sanches *et. al* (2005), isto ocorre devido as diferenças entre as arquiteturas dos dosséis agrícolas, bem como devido as densidades de semeadura e

espaçamentos entre linhas distintas. A transmissividade média é maior em plantas com folhas eretas, com é o caso do arroz, do que em plantas com folhas horizontais (por exemplo, soja) (Procópio *et al.*, 2003).

A característica intrínseca ao arroz irrigado de ser cultivado sob o sistema de irrigação permite, em teoria, que a cultura seja espectralmente distinguida das demais culturas agrícolas (Xiao *et al.*, 2002). No entanto, devido à espessura e ao conteúdo de matéria orgânica em suspensão na lâmina d'água, outras áreas com cultivos de primavera-verão de ciclo semelhante, como é o caso da soja e do milho podem ser incluídas no mapeamento (D'arco *et al.*, 2007).

É provável que os maiores erros, quanto à distribuição espacial, avaliados pelo índice *Kappa*, estejam relacionados à soja e tenham ocorrido nas regiões da Fronteira Oeste, Campanha e Depressão Central, pois essa cultura apresentou área semeada média semelhante a do arroz durante o período de estudo (Figura 23). Nas demais regiões é possível que os erros tenham sido menores, pois a área média cultivada com soja é bem inferior à cultivada com arroz. Os erros relacionados à cultura do milho provavelmente são os de menor magnitude, já que a área cultivada desse cereal dentro da região é bem menor quando comparada as áreas cultivadas com soja e arroz.

Portanto, mais do que a determinação exata das áreas de cultivo de arroz, esta metodologia, que apresenta características de baixo custo e facilidade de implantação quando comparada com quaisquer outras, deve ser considerada como uma forma de restringir a área a ser analisada em estudos de monitoramento agrícola e de modelagem do rendimento de grãos.

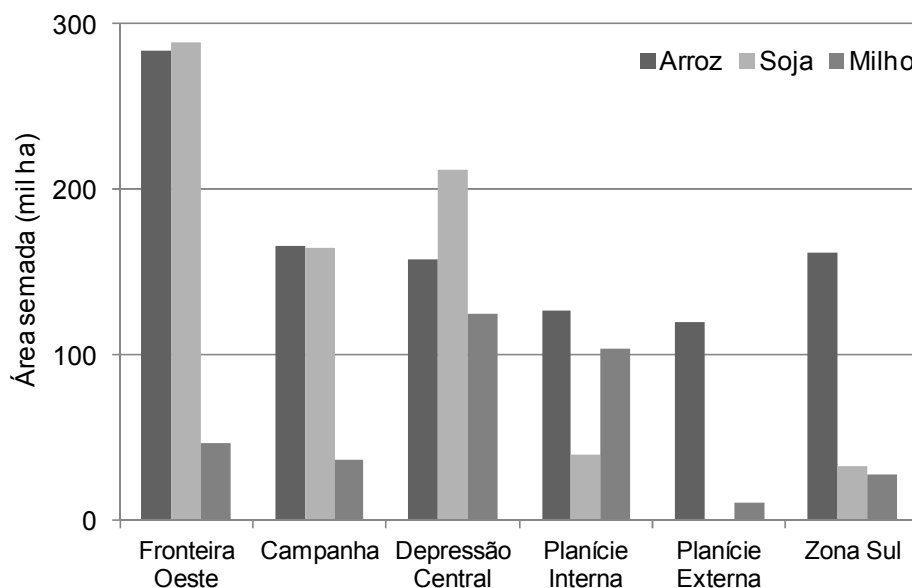


FIGURA 23. Área semeada média de arroz, soja e milho nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. Fonte dos dados: IBGE/LSPA (2012).

As Figuras referentes às distribuições espaciais das demais safras do período em estudo são apresentadas nos Apêndices 2 até 5 e apresentam padrão semelhante, conforme explicitado nos parágrafos acima.

4.2.2 Área potencial de cultivo do arroz irrigado

A partir da soma das áreas cultivadas com arroz irrigado em todas as safras de estudo (2000/01 até 2009/10) determinou-se a área potencial de cultivo do grão no Estado do Rio Grande do Sul (Figura 24). O mapeamento das áreas consideradas potenciais de serem utilizadas para o cultivo de arroz contabilizou 3.322.037 ha. Este valor é próximo à área passível de cultivo contabilizada em 4.000.000 descrita por Reis & Saibro (2004).

A área média cultivada, estimada a partir das imagens MODIS (Tabela 10), em cada safra analisada correspondeu a aproximadamente 30% da área potencial de cultivo. Assim, reforça-se a característica de adoção do sistema de

pousio e rotação de culturas na região orizícola do Rio Grande do Sul. Em áreas de várzeas, essas práticas são consideradas como alternativa eficiente para o controle de plantas daninhas, promovendo também o aumento do rendimento de grãos do arroz irrigado cultivado na sequência do pousio ou rotação com culturas de sequeiro.

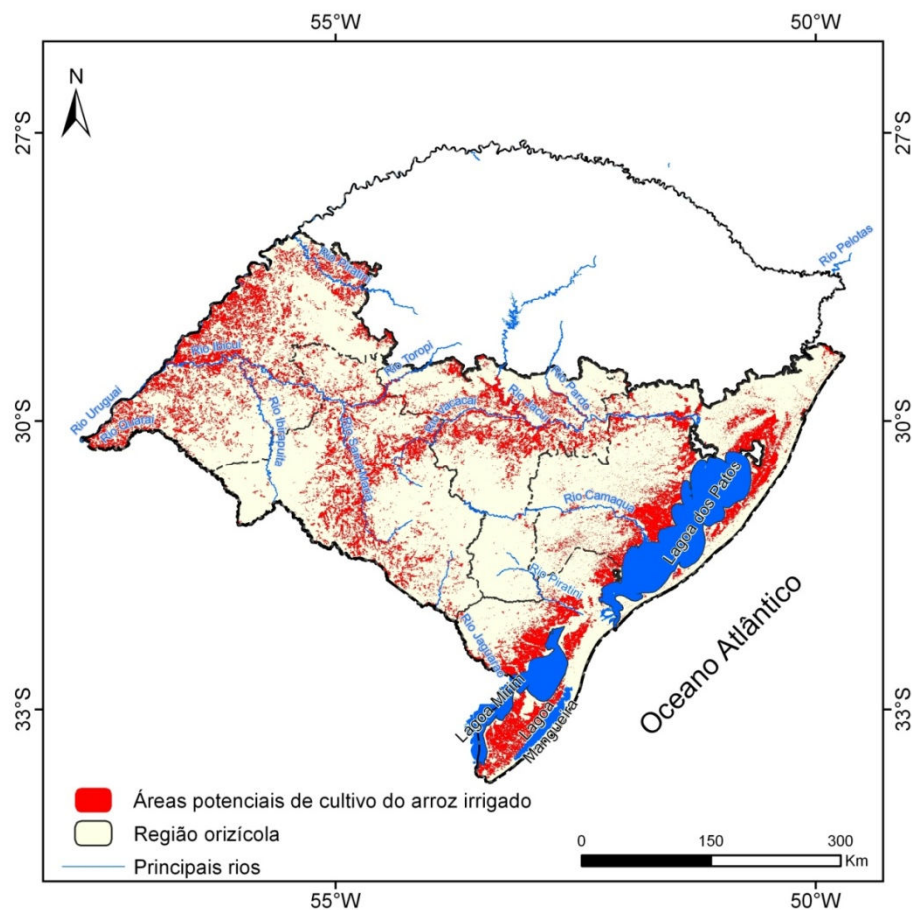


FIGURA 24. Áreas potenciais de cultivo do arroz irrigado na região orizícola do Rio Grande do Sul.

4.2.3 Avaliação do mapeamento

Através da análise da Tabela 11 percebe-se que, com exceção de Rio Pardo (3d), todos os municípios quando confrontados com a referência apresentaram subestimativas das áreas cultivadas com arroz irrigado. A maior subestimativa ocorreu no município de Santana do Livramento (2e) onde

deixaram de ser mapeados aproximadamente -54,7% da área cultivada (7.400 ha). A menor subestimativa foi de -5,2% sendo registrada no município de Cachoeira do Sul (3a) onde não foram incluídos no mapeamento cerca de 2.100 ha.

TABELA 11. Área estimada através de imagens MODIS (mil ha); Diferença percentual com relação à referência (*Landsat*); Erro de Omissão (%); Erro de Inclusão (%); Erro Geral (%), Exatidão Geral (E_g) (%); Índice *Kappa* (K).

Região (Município)	Área MODIS (1.000 ha)	Diferença em relação à referência (%)	Erro de Omissão*	Erro de Inclusão*	Erro Geral*	E_g (%)	K
1(a)	46,7	-49,5	55,5	12,5	43,0	92,3	0,55
1(b)	50,0	-30,0	50,8	31,9	18,9	89,3	0,51
1(c)	35,2	-42,2	56,9	25,3	31,6	97,2	0,53
1(d)	47,4	-6,2	55,5	52,6	2,9	93,6	0,42
1(e)	11,0	-52,3	56,8	9,3	47,5	93,1	0,55
2(a)	26,5	-44,0	56,6	22,4	34,2	96,9	0,54
2(b)	34,6	-10,2	51,8	46,3	5,5	96,2	0,49
2(c)	19,1	-24,4	57,0	43,0	14,0	97,1	0,48
2(d)	17,9	-7,9	52,9	48,8	4,1	95,9	0,47
2(e)	6,1	-54,7	62,8	17,8	45,0	99,3	0,51
3(a)	38,4	-5,2	47,1	44,3	2,8	94,9	0,52
3(b)	16,0	-38,8	60,3	35,0	25,3	95,6	0,47
3(c)	17,1	-24,5	52,0	36,4	15,6	89,9	0,49
3(d)	10,5	8,9	59,2	62,5	3,3	97,0	0,38
3(e)	8,8	-28,7	74,0	63,6	10,4	95,6	0,28

(1) Fronteira Oeste: (a) Uruguiana, (b) Itaqui, (c) Alegrete, (d) São Borja, (e) Barra do Quaraí; (2) Campanha: (a) Dom Pedrito, (b) São Gabriel, (c) Rosário do Sul, (d) Cacequi, (e) Santana do Livramento; (3) Depressão Central: (a) Cachoeira do Sul, (b) São Sepé, (c) Restinga Seca, (d) Rio Pardo, (e) Santa Maria; * erros referentes à classe “arroz”.

Quanto aos erros de omissão e inclusão relacionados à classe “arroz” observou-se que, novamente com exceção do município de Rio Pardo (3d), em porcentagem, os erros de omissão foram maiores que os erros de inclusão, ou seja, foram omitidos da classificação (Figura 25b) um maior percentual de *pixels* que foram determinados como “arroz” no mapa de referência (Figura 25a) do aqueles que foram classificados com “não arroz” e na verdade pertenciam a classe “arroz”..

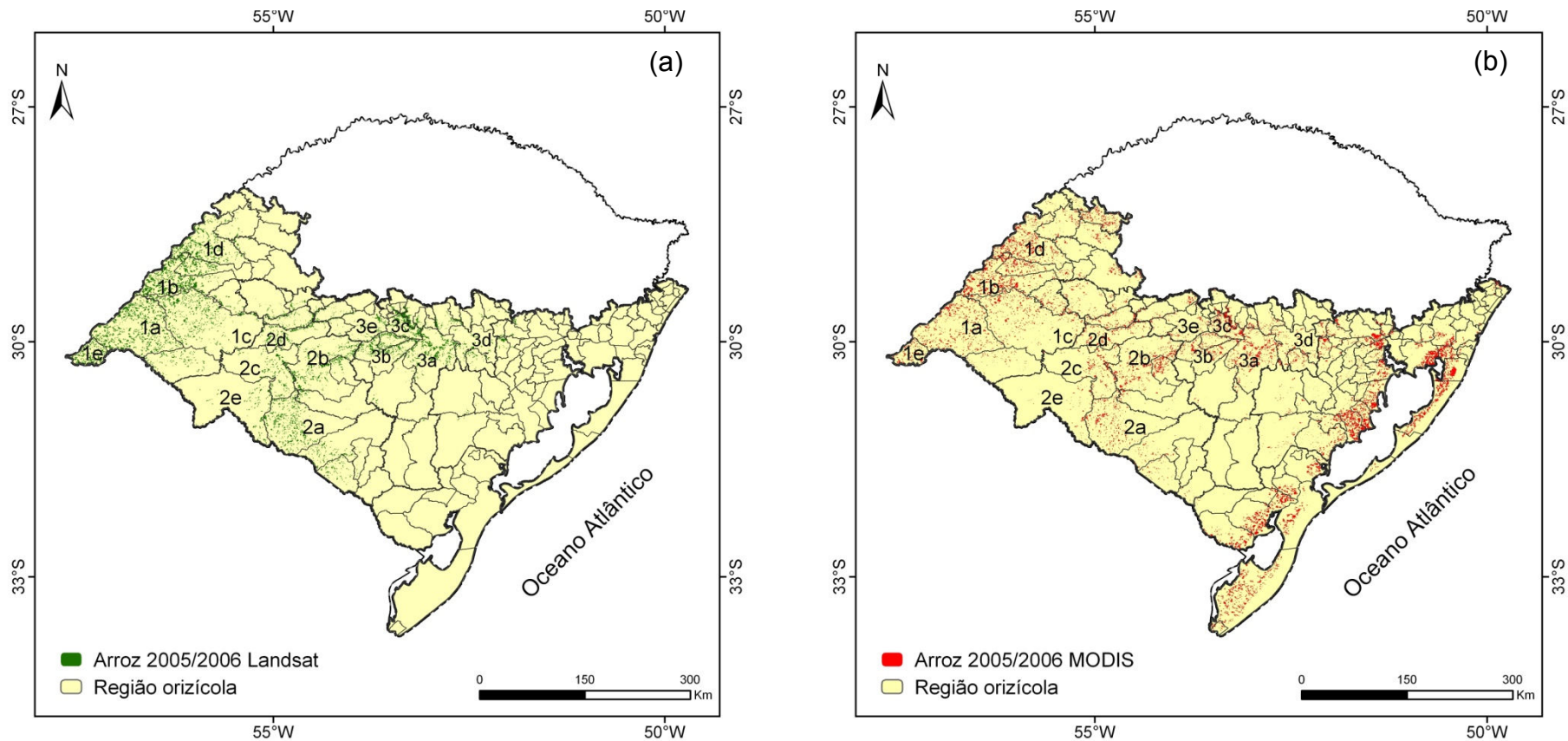


FIGURA 25. Mapa de referência, elaborado através de imagens *Landsat*, para a safra 2005/06 (a). Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, no Rio Grande do Sul durante a safra de 2005/06 (b). Municípios utilizados para avaliar a qualidade do mapeamento, pertencentes às regiões: (1) Fronteira Oeste: (a) Uruguaiana, (b) Itaqui, (c) Alegrete, (d) São Borja, (e) Barra do Quaraí; (2) Campanha: (a) Dom Pedrito, (b) São Gabriel, (c) Rosário do Sul, (d) Cacequi, (e) Santana do Livramento; (3) Depressão Central: (a) Cachoeira do Sul, (b) São Sepé, (c) Restinga Seca, (d) Rio Pardo, (e) Santa Maria.

Todos os municípios apresentaram Exatidão Geral (E_g) superiores a 85%. Segundo Guptill & Morrison (1995), este é o valor mínimo necessário para uma classificação ser aceitável, em relação à exatidão global, do ponto de vista do usuário da classificação.

Além das medidas expressas pela matriz de erros (erros de omissão, erros de inclusão e E_g), o índice *Kappa* é outro indicativo da acurácia do mapeamento, indicando o grau de concordância deste com a referência variando em um intervalo entre 0 a 1. Zero indica ausência de concordância e 1 demonstra total concordância entre os dados estimados e a referência. O cálculo de *Kappa* inclui o número total de acertos, os erros de omissão e os erros de inclusão, levando em conta também a localização. Os dados da imagem classificada e da imagem de referência são avaliados, também, com relação à sua posição no espaço. Em avaliações de classificação de imagens, valores de *Kappa* superiores a 0,50 usualmente são considerados satisfatórios (Motta *et al.*, 2001; Alvarenga *et al.*, 2005; Rizzi *et al.*, 2006).

Neste trabalho, obtiveram-se valores superiores ao satisfatório em sete municípios (Tabela 11), sendo eles Uruguaiana (1a), Itaqui (1b), Alegrete (1c), Barra do Quaraí (1e), Dom Pedrito (2a), Santana do Livramento (2e) e Cachoeira do Sul (3a). Observou-se também, valores próximos ao satisfatório (0,50), variando entre 0,47 e 0,49, em outros cinco municípios. Apenas os municípios de Rio Pardo (3d) e Santa Maria (3e) apresentaram uma baixa concordância entre os dados classificados e os do mapa de referência, ilustrados por valores de 0,38 e 0,28 de *Kappa*, respectivamente

Os resultados das medidas expressas pelas matrizes de erro e pelos índices *Kappa* não nos permitem uma avaliação definitiva quanto à qualidade

do mapeamento elaborado através da classificação digital supervisionada de imagens MODIS. No entanto indicam uma tendência de subestimativa das áreas cultivadas com arroz irrigado e qualidade satisfatória com relação à distribuição espacial. É importante salientar que, a resolução temporal das imagens NDVI/MODIS é de 250 metros, ou seja, a área mínima identificada pelo sensor é de 6,25 ha. Entretanto, este não deve ser um fator determinante, pois segundo dados do IRGA apenas 3,4% das lavouras de arroz irrigado do Rio Grande do sul apresentam tamanho inferior a 25 ha (IRGA, 2006).

O indicativo de subestimativas das áreas cultivadas com arroz irrigado através da classificação de imagens MODIS com relação ao mapeamento com imagens *Landsat*, considerado como referência, pode ser considerado positivo, pois é possível que a inclusão de áreas cultivadas com outras culturas agrícolas de calendário agrícola semelhante tenha sido reduzida (Figura 25).

4.3 Rendimento de grãos de arroz irrigado

4.3.1 Perfis temporais de NDVI/MODIS

Os perfis temporais de NDVI, gerados a partir de observações sequenciais desse índice, indicam a evolução temporal de biomassa verde de um dossel. Esta é uma informação bastante útil, dado que o perfil temporal do NDVI de uma área agrícola permite o monitoramento do desenvolvimento fenológico e a detecção de anomalias no crescimento de culturas longo das safras (Deppe *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2009).

Sabe-se que a biomassa acumulada pelas plantas, durante seu ciclo de desenvolvimento, está relacionada ao rendimento de grãos. Maiores acúmulos de biomassa correspondem a maior quantidade de fotoassimilados disponível

para a formação e o enchimento de grãos e, na ausência de outros fatores, indicam maiores rendimentos (Junges, 2011). Assim, a partir do acompanhamento sistemático e continuado da fenologia é possível se estabelecer inferências quanto ao acúmulo de biomassa, e, portanto do rendimento de grãos. Estas informações são de grande valia para programas de previsão de safras, pois permitem o aprimoramento de modelos de estimativa de rendimento.

Dentro deste contexto, foi analisada neste trabalho a variabilidade espacial dos perfis temporais de NDVI/MODIS, das áreas cultivadas com arroz irrigado, bem com as relações entre estes perfis e a variabilidade climática e entre os perfis e o rendimento de grãos da cultura.

4.3.1.1 Média e variabilidade dos perfis temporais de NDVI/MODIS

Os perfis temporais médios de NDVI (Figura 26) das diferentes regiões orizícolas, elaborados a partir da aplicação das máscaras de cultivo, indicaram a variação temporal esperada de um índice de vegetação extraído de áreas agrícolas cultivadas para a produção de grãos. Através da análise da Figura 26, percebe-se que os perfis temporais médios foram muitos semelhantes em todas as regiões orizícolas e apresentaram associação com as principais etapas de desenvolvimento da cultura do arroz irrigado.

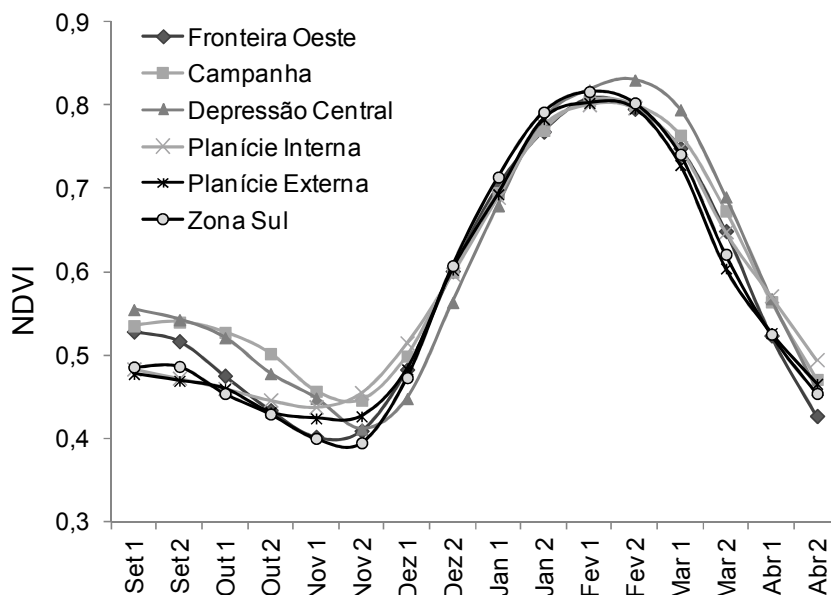


FIGURA 26. Perfis temporais médios de NDVI/MODIS, das áreas cultivadas com arroz irrigado, nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: setembro a abril das safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.

Entre a segunda quinzena de setembro e a primeira quinzena de novembro os valores de NDVI foram baixos, variando entre 0,55 e 0,43. Valores baixos são esperados, pois este é o período recomendado com preferencial para a implantação da cultura no Estado (Steinmetz *et al.*, 2007). Os valores de NDVI durante este período refletem as etapas de germinação e início do desenvolvimento vegetativo da cultura.

Nas quinzenas subsequentes, os valores observados decresceram (até 0,40), em virtude do período de aplicação da lâmina d'água. Segundo Xiao *et al.* (2006), durante este período os valores de NDVI deveriam ser negativos, refletindo principalmente o comportamento espectral da água, entretanto valores positivos também foram encontrados por D'arco *et al.* (2007). Segundo os últimos autores, a pequena profundidade da lâmina d'água e a consequente influência da resposta espectral do solo, assim como a grande quantidade de

matéria orgânica em suspensão contribuem para que os valores de NDVI se mantenham positivos neste período.

Entre novembro e fevereiro os valores de NDVI são crescentes, atingindo o máximo na primeira quinzena de fevereiro (0,84), ou seja, no período correspondente a floração. A partir de então as plantas passam a translocar nutrientes para a formação dos grãos, fazendo com que os valores de NDVI voltem a decrescer. Após o florescimento a redução de biomassa verde ocorre tanto pela remobilização dos nutrientes, previamente armazenados no colmo, folhas e raízes, quanto pela senescência foliar (Yoshida, 1981).

Os perfis temporais de NDVI das áreas cultivadas com arroz irrigado, em cada região e safra analisada, apresentaram um padrão de evolução temporal semelhante à descrita nos parágrafos anteriores e estão apresentadas nos Apêndices 6 até 11.

A variabilidade interanual dos perfis temporais de NDVI, das áreas cultivadas com arroz irrigado, nas diferentes regiões orizícolas foram analisadas na Figura 27.

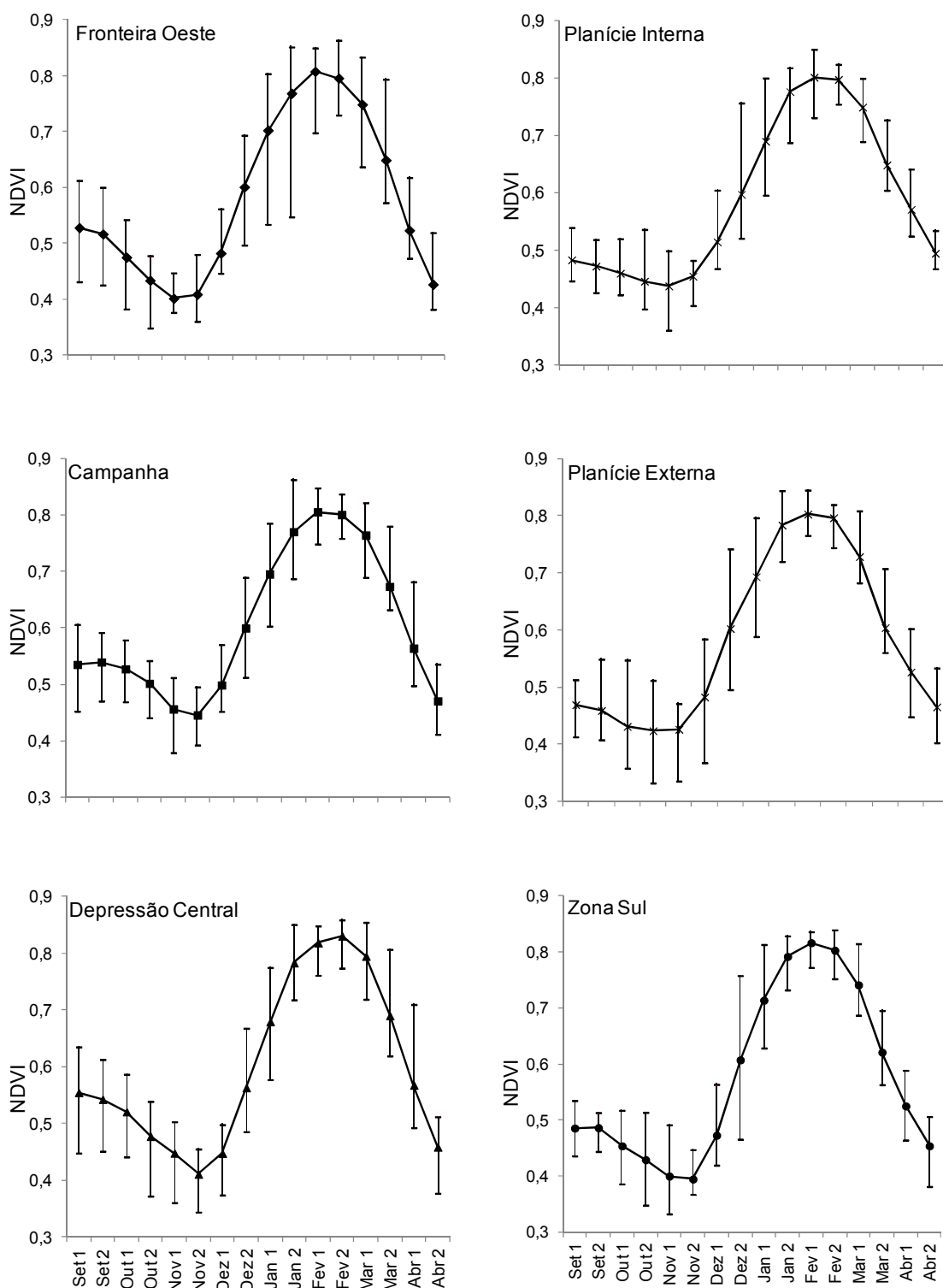


FIGURA 27. Perfis temporais de NDVI/MODIS (valores mínimos, médios e máximos) das áreas cultivadas com arroz irrigado nas regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.

É possível observar que as maiores amplitudes ocorreram nas quinzenas correspondentes ao período de desenvolvimento vegetativo. As maiores amplitudes foram observados até a segunda quinzena de dezembro na região da Planície Interna, até a primeira quinzena de janeiro na Depressão Central e Zona Sul, até a segunda quinzena de janeiro na Fronteira Oeste, Campanha, e Planície Externa. Neste período os valores de NDVI variaram em até 0,30 unidades. Estes resultados podem ser consequência das diferentes condições meteorológicas e/ou de manejo ocorridas entre as diferentes safras. As condições meteorológicas, especialmente de temperatura do ar e radiação solar afetam a produção de biomassa, enquanto que práticas de manejo, tais como adubação nitrogenada e redução da densidade de semeadura atuam sobre a expansão e o crescimento da área foliar (Cruz, 2010).

As menores amplitudes de variação dos valores de NDVI, das áreas de arroz irrigado, ocorreram nos períodos próximos à quinzena na qual se observou o maior valor do índice de vegetação. Observaram-se os menores valores de amplitude na primeira quinzena de fevereiro nas regiões da Fronteira oeste e Zona Sul e na segunda quinzena de fevereiro nas demais regiões orizícolas. A menor variabilidade do NDVI ocorrida nos períodos próximos aos maiores valores está associada, provavelmente, a característica de saturação do NDVI. Segundo Ponzoni (2001), a saturação do NDVI ocorre em função da relação não-linear entre a reflectância da vegetação e o incremento de biomassa verde. Esta característica se constitui na maior limitação ao uso do NDVI para inferências quantitativas.

Estes resultados indicam que os perfis temporais de NDVI/MODIS, das áreas cultivadas com arroz irrigado, podem ser úteis para o monitoramento do desenvolvimento da cultura na região de estudo.

4.3.1.2 Variabilidade dos perfis temporais de NDVI associada ao fenômeno ENOS

Os perfis temporais médios de NDVI/MODIS, das áreas cultivadas com arroz irrigado nas regiões orizícolas, considerando as safras de ocorrência de El Niño e La Niña são apresentados na Figura 28. Observa-se que para as safras de La Niña, o NDVI médio apresentou os valores mínimos com defasagem de uma ou duas quinzenas em relação aos mínimos NDVI das safras de El Niño em praticamente todas as regiões.

Explicar o porquê destas diferenças é complexo. Mas parte deste entendimento se baseia no fato de que na primavera do ano de início da fase fria do ENOS (La Niña), em consequência da menor nebulosidade associada à diminuição de precipitação pluvial, tem-se um maior resfriamento do solo em função da maior perda de radiação de onda longa durante a noite (Pereira *et al.*, 2002).

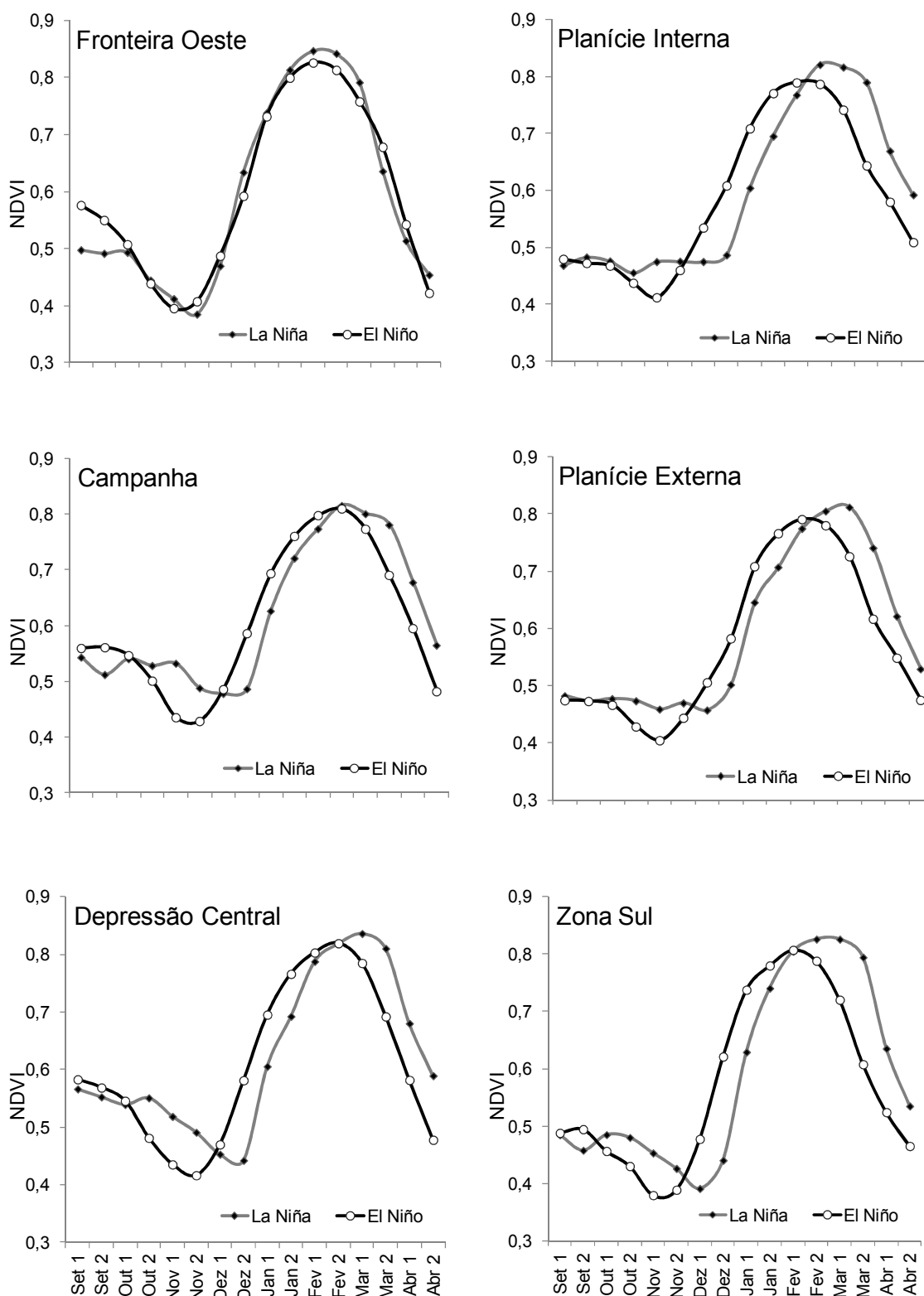


FIGURA 28. Perfis temporais médios de NDVI/MODIS, das áreas cultivadas com arroz irrigado, das safras de ocorrência de La Niña e El Niño nas regiões da Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul.

Em safras de ocorrência de La Niña na metade sul do Estado, o preparo do solo para a semeadura normalmente é concluído antes do período recomendado como preferencial em virtude do maior número de dias sem precipitação pluvial (Carmona & Berlato, 2002). No entanto, a semeadura pode vir a ser retardada em função da temperatura do solo não ter atingido o mínimo recomendado (20 °C). É indicado que o agricultor retarde a semeadura nesta situação, visto que temperaturas do solo menores do que 20 °C podem provocar um crescimento do dossel desuniforme e conseqüentemente baixo rendimento de grãos (Terres, 1991; Steinmetz *et al.*, 2009).

Pode-se inferir a partir dos perfis temporais médio de NDVI dos anos de La Niña, que o atraso no desenvolvimento inicial das plantas pode ocorrer em função das menores temperaturas noturnas do ar, o que é característico de anos de ocorrência da fase fria do fenômeno ENOS.

Os perfis temporais, das safras de El Niño e La Niña, apresentaram NDVI máximos em quinzenas coincidentes apenas nas regiões Fronteira Oeste e Campanha. Nas demais regiões, os valores de máximos de NDVI nas safras de La Niña ocorreram conforme o esperado, ou seja, também, com defasagem de uma a duas quinzenas.

É importante destacar que os máximos valores de NDVI foram observados nos perfis referentes às safras de La Niña, associados a maiores acúmulos de biomassa verde e conseqüentemente maiores rendimentos de grãos. Embora as condições meteorológicas não tenham sido usadas diretamente na associação apresentada neste tópico, é importante ressaltar que as condições distintas ocorridas em anos de ENOS tem uma importante relação com o rendimento final de grãos de arroz irrigado.

Recomenda-se que esta associação seja objeto de investigação, dado que estudos anteriores têm demonstrado que grande parte da variabilidade do rendimento de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul está atrelada a ocorrência de eventos ENOS. Em geral, em safras de ocorrência de El Niño são observados rendimentos de grãos de arroz irrigado abaixo da média, enquanto que, em safras caracterizadas por La Niña os rendimentos de grãos tendem a serem superiores a média (Carmona & Berlato, 2002).

Este trabalho apresentou resultados coerentes com o exposto no parágrafo anterior. Em safras caracterizadas por El Niño (Tabela 4) foram observados, em todas as regiões, rendimentos de grãos corrigidos (após a retirada da tendência tecnológica) inferiores a média ou muito próximos desta (Figura 18). Já nas safras de ocorrência de La Niña foi observado comportamento oposto, ou seja, em todas as regiões, os rendimentos corrigidos foram muito próximos ou superiores a média. Dentro deste contexto, pode-se dizer que, com o conjunto de dados utilizados neste trabalho, os perfis temporais médios das safras de ocorrência de El Niño são representativos de menores rendimentos e os perfis de La Niña são representativos de maiores rendimentos de grãos de arroz irrigado.

4.3.1.3 Tendência temporal do NDVI

As séries temporais de NDVI das áreas cultivadas com arroz irrigado, abrangendo todo o período de estudo (2000/01 até 2009/10), das regiões orizícolas são apresentadas na Figura 29. Em todas as regiões orizícolas não foram observadas tendências significativas de aumento ou redução do NDVI no período.

Levando-se em conta o fato de que o rendimento de grãos de arroz irrigado está associado à quantidade de biomassa produzida, esperava-se que as séries temporais de NDVI, assim com ocorreu as séries temporais de rendimento de grãos (Figura 16), apresentassem tendências de incremento, o que não ocorreu.

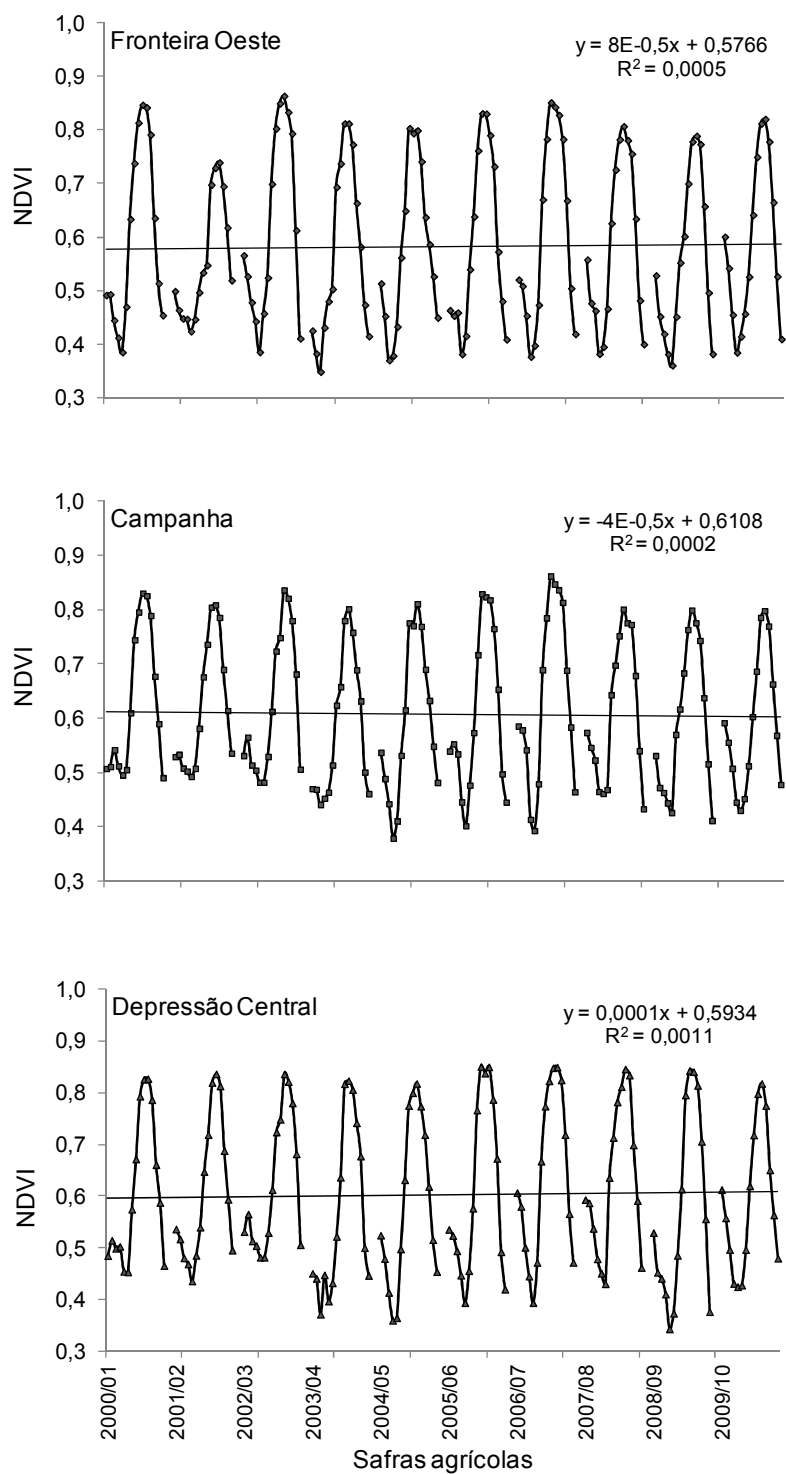
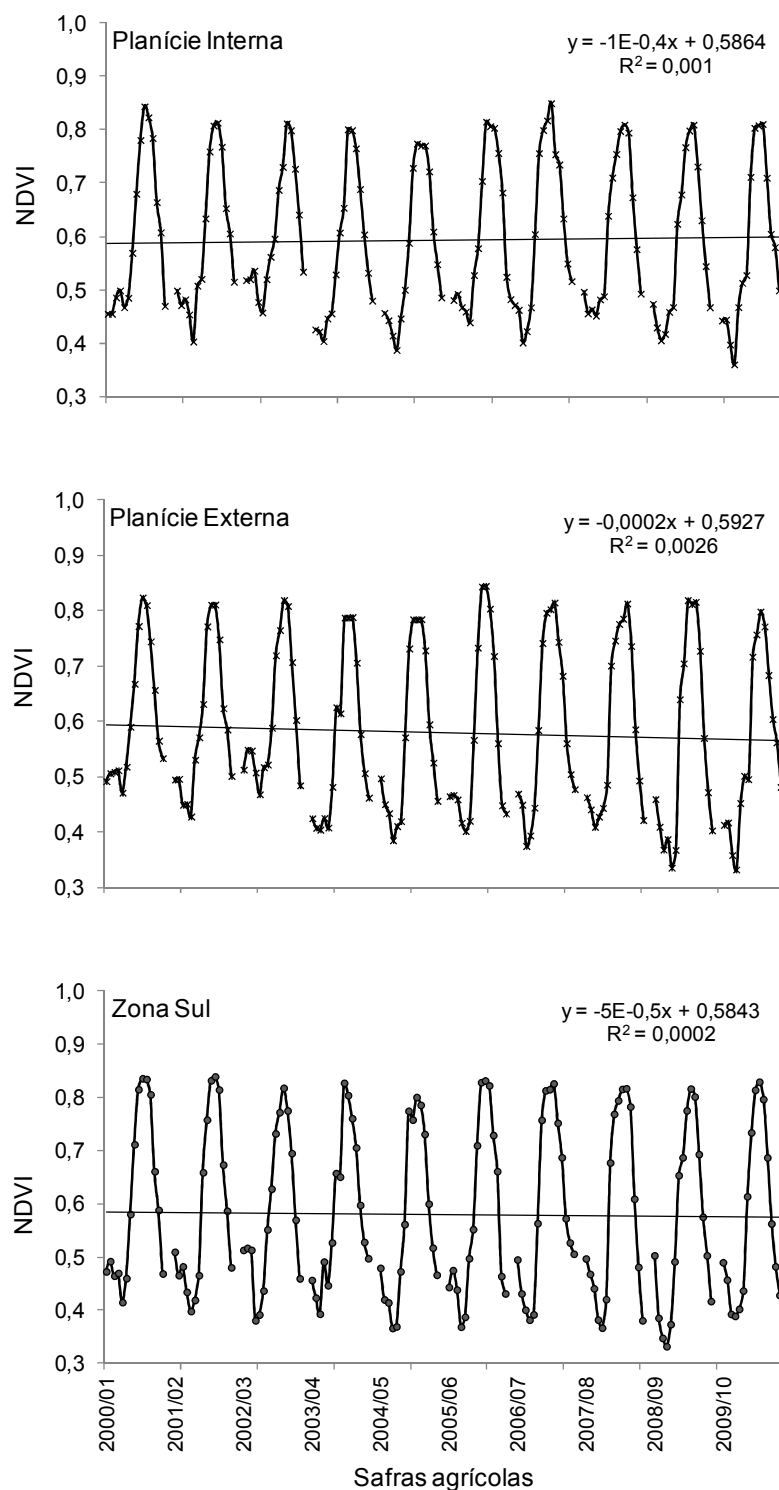


FIGURA 29. Evolução temporal do NDVI, das áreas cultivadas com arroz irrigado, nas regiões orizícolas da Fronteira Oeste, Campanha e Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.



CONTINUAÇÃO FIGURA 29. Evolução temporal do NDVI, das áreas cultivadas com arroz irrigado, nas regiões orizícolas da Fronteira Oeste, Campanha e Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.

Apesar de parecer incoerente com a tendência observada de incremento dos rendimentos de grãos no tempo os resultados são explicáveis. O NDVI apresenta tendência de saturação em condição de alta biomassa e, portanto, mesmo que novas variedades e/ou práticas de manejo que resultem em maior potencial de acúmulo de biomassa estejam sendo introduzidos, o NDVI não é capaz de detectar tais variações. Com isto, permanecem estáveis no tempo os valores máximos, com conseqüente ausência de tendência temporal.

Quando se analisou a variação temporal do NDVI, em nível mensal, somente o mês de novembro (Figura 30) apresentou tendência de diminuição de NDVI, em todas as regiões. No entanto, as tendências foram significativas estatisticamente, a 10% de probabilidade pelo teste *t-Student*, para as regiões Fronteira Oeste, Campanha, Planície Externa e Zona Sul. Esse resultado pode ser atribuído às novas técnicas de manejo da cultura introduzidas no Rio Grande do Sul pelo Instituto Rio Grandense do Arroz Irrigado (IRGA) nos últimos dez anos. Como exemplo, pode-se citar a antecipação data de semeadura e conseqüentemente a antecipação do início da irrigação por inundação. Esta recomendação pode estar determinando que os valores de NDVI, ao longo do período de estudo, apresentem tendência de diminuição neste mês.

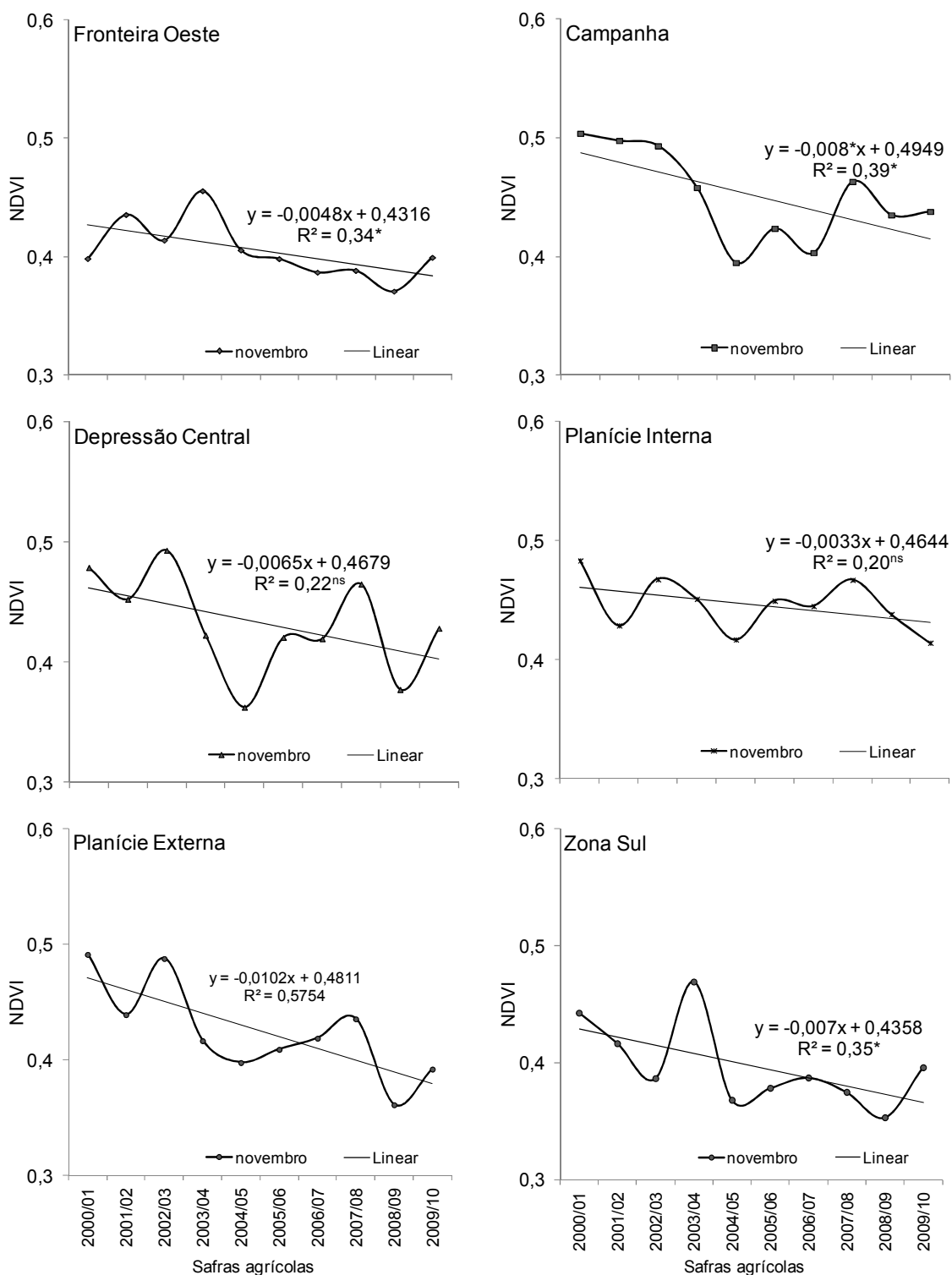


FIGURA 30. Evolução temporal do NDVI do mês de novembro, referente às áreas cultivadas com arroz irrigado, nas regiões orizícolas da Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10, * Coeficiente de inclinação da reta significativo a 10%.

4.3.2 Correlações

4.3.2.1 Variáveis espectrais e o rendimento de grãos de arroz irrigado

Para cada região foram analisadas vinte e cinco correlações entre os dados de rendimento de grãos de arroz irrigado e de NDVI, considerando-se os valores quinzenais e os valores correspondentes à integração do NDVI durante o período de crescimento da cultura (Tabela 12 e 13). Das correlações analisadas, dezesseis foram significativas na Fronteira Oeste, seis na Campanha, dez na Depressão Central, doze na Planície Interna, vinte na Planície Externa e dezesseis na Zona Sul.

TABELA 12. Coeficientes de correlação de Pearson entre os valores de NDVI de dezesseis dias e os rendimentos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2009/01 até 2000/10.

NDVI		Região					
		1	2	3	4	5	6
Setembro	1	-0,21	-0,52*	0,27	-0,38	-0,53*	-0,60
	2	-0,12	-0,28	0,33	-0,30	-0,49*	-0,04
Outubro	1	-0,32	-0,70**	-0,11	-0,64**	-0,71**	-0,47*
	2	-0,16	-0,79***	-0,08	-0,77*	-0,77***	-0,73***
Novembro	1	-0,77***	-0,43	-0,47*	-0,58**	-0,73***	-0,48*
	2	-0,02	-0,35	-0,67*	0,38	-0,51*	-0,31
Dezembro	1	0,21	0,43	-0,50*	-0,02	-0,39	0,37
	2	0,34	0,53*	0,31	0,49*	0,47*	0,79***
Janeiro	1	0,08	0,56**	0,41	0,47*	0,73***	0,63**
	2	0,06	0,51*	0,55**	0,39	0,50*	0,51*
Fevereiro	1	-0,13	0,52*	0,75***	0,19	0,11	0,36
	2	-0,37	-0,30	0,25	-0,31	-0,25	-0,40
Março	1	-0,30	-0,55**	0,17	-0,52*	-0,52*	-0,65**
	2	-0,65**	-0,67**	-0,19	-0,54*	-,073	-0,77***
Abril	1	-0,76***	-0,72***	-0,52*	-0,67**	-0,72***	-0,70**
	2	-0,42	-0,38	-0,69**	-0,37	-0,83***	-0,44*

(1) Fronteira Oeste; (2) Campanha; (3) Depressão Central; (4) Planície Interna; (5) Planície Externa; (6) Zona Sul. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

TABELA 13. Coeficientes de correlação de Pearson entre os valores de NDVI – mensais e integração do período de crescimento - e os rendimentos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.

NDVI	Região					
	1	2	3	4	5	6
Setembro	-0,17	0,26	0,30	-0,34	-0,54*	-0,40
Outubro	-0,26	-0,15	-0,10	-0,75***	-0,76***	-0,63**
Novembro	-0,46*	-0,65**	-0,59**	-0,35	-0,75***	-0,44*
Dezembro	0,32	0,49*	0,01	0,34	0,10	0,70**
Janeiro	0,07	0,44*	0,52*	0,47*	0,73***	0,70**
Fevereiro	-0,26	0,11	0,69**	-0,03	-0,12	-0,12
Março	-0,51*	-0,54*	-0,02	-0,55**	-0,67**	-0,74***
Abril	-0,69**	-0,87***	-0,66**	-0,63**	-0,81***	-0,64**
Integração	-0,32	-0,55**	-0,22	-0,43	0,85***	-0,17

(1) Fronteira Oeste; (2) Campanha; (3) Depressão Central; (4) Planície Interna; (5) Planície Externa; (6) Zona Sul. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

Através da análise das Tabelas 12 e 13 nota-se que os padrões de correlações obtidos refletem adequadamente a relação entre o acúmulo de biomassa verde e rendimento de grãos ao longo do ciclo da cultura.

Observa-se que a maior parte das correlações foram negativas no período de implantação (setembro, outubro e novembro), positivas durante o período de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo (dezembro, janeiro até meados de fevereiro), e, novamente negativas após o florescimento até o final do ciclo (final de fevereiro, março e abril). Este padrão de resposta dos coeficientes de correlação foi encontrado, também, por Klering (2007) para a cultura do arroz irrigado e por Junges (2011) para a cultura do trigo.

Correlações positivas significativas estatisticamente ocorreram entre o final de dezembro, janeiro e início de fevereiro em todas as regiões, com exceção da Fronteira Oeste. Janeiro foi o mês com maior frequência de correlações positivas significativas, indicando que quanto maior for o

desenvolvimento da biomassa das plantas (maior NDVI) neste mês, maior é a chance de obterem-se altos rendimentos de grãos.

Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Chang *et al.* (2005), que em estudo realizado em Taiwan, encontraram as maiores correlações positivas entre o NDVI e o rendimento de grãos de arroz no estágio de emborrachamento. Segundo os autores, as informações espectrais obtidas durante este estágio fenológico são as mais adequadas para o ajuste de modelos de estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado.

Conforme o esperado, correlações negativas significativas ocorreram, em todas as regiões, nos períodos correspondentes ao início e final do ciclo da cultura, pois menores valores de NDVI indicam menores acúmulos de biomassa. No entanto, essas informações podem ser utilizadas somente como indicativas de início e fim de ciclo, já que menores acúmulos de biomassa não podem ser associados de forma linear e direta a maiores rendimentos de grãos. Talvez possa se fazer uma inferência de que correlações negativas significativas em outubro e novembro indicam que a cultura está sendo implantada no período recomendado, e, portanto maiores rendimentos poderão ser esperados.

Nas correlações referentes aos valores integrados do NDVI durante o período de crescimento da cultura foi obtido apenas um valor positivo, significativo a 1% de probabilidade na região da Planície Externa.

4.3.2.2 Variáveis meteorológicas e o rendimento de grãos de arroz irrigado

Através da análise das correlações apresentadas nas Tabelas 14 e 15, nota-se que a radiação solar global e o rendimento de grãos de arroz irrigado apresentam associação em todas as regiões. A maior parte dos coeficientes de correlação positivos significativos estatisticamente foram obtidos em novembro e dezembro. Nestes meses, segundo o calendário médio da cultura para o Rio Grande do Sul (Figura 12), a maior parte das lavouras encontra-se em desenvolvimento vegetativo. Isto indica que este elemento meteorológico pode ser limitante ao rendimento de grãos neste período em todas as regiões. De acordo com Heinemann *et al.* (2009), o sombreamento durante a fase vegetativa pode ter influência sobre o rendimento de grãos de arroz irrigado e seus componentes, assim durante esta fase deve-se maximizar a interceptação de radiação solar.

Foram observadas, também, correlações positivas significativas durante os meses de janeiro e fevereiro, quando grande parte da área cultivada encontra-se no período reprodutivo, nas regiões Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Assim, nestas regiões é possível que a baixa disponibilidade de radiação solar penalize o rendimento de grãos. Segundo Steinmetz (2004), o rendimento de grãos está diretamente relacionado com a disponibilidade de radiação solar durante os períodos reprodutivos e de maturação. Para regiões tropicais, Yoshida & Parao (1976) verificaram que o decréscimo nos rendimentos de grãos pode chegar a 70%, caso as plantas de arroz sejam submetidas a baixos níveis de radiação solar.

TABELA 14. Coeficientes de correlação de Pearson entre a radiação solar global de dezesseis dias e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.

Radiação solar		Região					
		1	2	3	4	5	6
Setembro	1	-0,54*	0,26	0,25	0,50	0,11	0,52*
	2	-0,53*	-0,42	-0,08	0,21	-0,07	0,05
Outubro	1	0,15	0,34	0,23	0,20	0,01	0,06
	2	0,19	0,31	-0,04	0,09	0,19	-0,15
Novembro	1	0,08	-0,04	0,57**	0,46*	0,41	0,26
	2	0,68**	0,49*	0,85***	0,63**	0,65**	0,46*
Dezembro	1	0,23	0,63**	0,67**	0,13	0,32	0,46*
	2	0,47*	0,33	0,42	0,59**	0,48*	0,46*
Janeiro	1	-0,16	-0,13	0,05	0,19	0,52*	0,06
	2	-0,23	0,15	-0,37	0,26	-0,12	-0,63**
Fevereiro	1	-0,18	0,07	0,17	0,50*	0,29	0,49*
	2	0,14	-0,11	0,21	0,25	-0,28	-0,50*
Março	1	0,10	0,34	0,72***	0,07	0,11	0,17
	2	-0,26	-0,06	-0,08	0,53*	0,48*	-0,20
Abril	1	-0,10	-0,05	-0,06	0,23	-0,03	0,37
	2	-0,29	0,37	0,05	0,23	0,30	-0,20

(1) Fronteira Oeste; (2) Campanha; (3) Depressão Central; (4) Planície Interna; (5) Planície Externa; (6) Zona Sul.***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

TABELA 15. Coeficientes de correlação de Pearson entre a radiação solar global mensal e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.

Radiação Solar	Região					
	1	2	3	4	5	6
Setembro	-0,62**	-0,07	0,11	0,47*	0,05	0,43
Outubro	0,17	0,36	0,10	0,17	0,04	-0,08
Novembro	0,67**	0,44*	0,92***	0,64**	0,62**	0,40
Dezembro	0,40	0,59**	0,77***	0,35	0,43*	0,46*
Janeiro	-0,23	0,07	-0,24	0,31	0,34	-0,39
Fevereiro	0,02	-0,08	0,28	0,68**	-0,13	0,01
Março	-0,09	0,19	0,64**	0,33	0,39	-0,02
Abril	-0,22	0,15	-0,01	0,28	0,20	0,17

(1) Fronteira Oeste; (2) Campanha; (3) Depressão Central; (4) Planície Interna; (5) Planície Externa; (6) Zona Sul.***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

As correlações positivas indicam que, nos anos com maiores disponibilidades de radiação solar, são obtidos os maiores rendimentos de grãos.

As correlações envolvendo a temperatura mínima do ar (número de dias com temperatura mínima igual ou inferior a 15°C e temperatura mínima absoluta) e o rendimento corrigido de grãos de arroz irrigado apresentaram valores negativos em diversos períodos e em todas as regiões (Tabelas 16, 17, 18 e 19). Isto demonstra que uma maior ocorrência de dias com temperaturas mínimas baixas é um fator que pode penalizar o rendimento de grãos, conforme apontado por Carmona *et al.* (2002).

Com relação à temperatura mínima do ar menor ou igual a 15°C (Tabelas 16 e 17), o mês mais crítico foi março. Neste mês, onde parte das áreas cultivadas ainda encontra-se no período reprodutivo, foram observados os maiores valores negativos de correlação em grande parte das regiões. Estes resultados, especialmente para as regiões Campanha e Zona Sul, onde houve significância estatística, concordam com o mapeamento do risco de frio durante o período reprodutivo do arroz irrigado no Rio Grande do Sul proposto por Steinmetz & Amaral (2002). Segundo os autores, justamente nessas regiões, o risco de ocorrência de temperatura mínima do ar menor ou igual a 15°C é mais acentuado.

TABELA 16. Coeficientes de correlação entre o número de dias com temperatura mínima do ar menor ou igual 15°C (ND Tmin≤15°C) de dezesseis dias e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.

ND Tmin≤15°C		Região					
		1	2	3	4	5	6
Setembro	1	0,02	0,39	-0,04	-0,08	0,15	0,63**
	2	0,07	-0,25	0,12	0,38	-0,20	0,48*
Outubro	1	0,23	0,45*	0,03	0,18	-0,29	0,30
	2	0,03	0,06	-0,29	-0,07	-0,55**	-0,23
Novembro	1	0,13	0,09	0,17	0,12	0,43*	0,23
	2	0,38	0,48*	0,50*	0,39	0,66**	0,10
Dezembro	1	0,26	0,33	0,40	0,60**	-0,01	0,01
	2	0,51*	0,38	0,18	0,03	-0,18	-0,16
Janeiro	1	0,35	0,28	0,41	0,81***	0,16	0,30
	2	-0,14	0,19	0,25	0,14	0,09	-0,06
Fevereiro	1	-0,10	0,01	0,30	0,26	0,47*	0,02
	2	-0,25	-0,34	-0,22	0,08	-0,42	-0,54**
Março	1	-0,35	-0,24	0,09	0,01	-0,40	-0,15
	2	-0,22	-0,56**	-0,08	-0,16	0,22	-0,76***
Abril	1	-0,71***	-0,73***	-0,35	-0,40	-0,06	-0,40
	2	0,47*	0,38	0,15	0,08	0,33	-0,42

(1) Fronteira Oeste; (2) Campanha; (3) Depressão Central; (4) Planície Interna; (5) Planície Externa; (6) Zona Sul. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

TABELA 17. Coeficientes de correlação entre o número de dias com temperatura mínima do ar menor ou igual 15°C mensais (ND Tmin≤15°C) e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.

ND Tmin≤15°C	Região					
	1	2	3	4	5	6
Setembro	0,04	0,27	0,03	0,77***	-0,03	0,66**
Outubro	0,15	0,36	-0,13	0,05	-0,47*	0,06
Novembro	0,42	0,37	0,52*	0,34	0,66**	0,19
Dezembro	0,43	0,45*	0,39	0,45*	-0,14	-0,09
Janeiro	0,18	0,27	0,42	0,57**	0,19	0,18
Fevereiro	-0,26	-0,26	-0,01	0,22	-0,19	-0,41
Março	-0,37	-0,51*	-0,02	-0,12	0,11	-0,73***
Abril	-0,35	-0,38	-0,20	-0,27	0,15	-0,60**

(1) Fronteira Oeste; (2) Campanha; (3) Depressão Central; (4) Planície Interna; (5) Planície Externa; (6) Zona Sul. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

O coeficiente de correlação negativo, significativo a 5% de probabilidade pelo teste *t-Student*, obtido na região da Zona Sul para o período referente ao final de fevereiro (Tabela 16) é coerente com o observado por Mota (1994). Segundo o autor, a variação do rendimento de grãos de arroz irrigado na Zona Sul do Estado depende em 42% das horas de frio ocorridas durante o mês de fevereiro.

Quanto aos coeficientes de correlação entre as temperaturas mínimas absolutas e os rendimentos de grãos pode-se observar, através das Tabelas 18 e 19, que as correlações negativas significativas foram observadas nas regiões Fronteira Oeste, Campanha, Planície Interna e Planície Externa no início de outubro. Fato que pode estar associado à redução dos rendimentos de grãos de arroz irrigado em decorrência de baixas temperaturas logo após semeadura.

TABELA 18. Coeficientes de correlação de Pearson entre a temperatura mínima absoluta do ar (Tminabs) de dezesseis dias e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.

Tminabs	Região						
		1	2	3	4	5	6
Setembro	1	0,19	-0,08	-0,41	-0,3	-0,57**	-0,68**
	2	-0,78***	-0,65**	-0,65**	-0,43	0,13	-0,30
Outubro	1	-0,33	-0,36	-0,07	-0,18	0,16	-0,03
	2	0,55*	0,02	0,48*	0,77***	0,41	0,36
Novembro	1	-0,43	-0,26	-0,35	-0,32	-0,65**	-0,31
	2	-0,57**	-0,56**	-0,12	-0,69**	-0,54*	-0,07
Dezembro	1	-0,37	-0,21	0,15	-0,54*	-0,13	-0,04
	2	-0,38	-0,57**	-0,52*	-0,35	-0,12	-0,10
Janeiro	1	-0,30	-0,28	-0,15	-0,82***	-0,22	-0,41
	2	0,07	-0,27	-0,03	0,20	-0,35	-0,13
Fevereiro	1	0,15	-0,01	-0,40	-0,41	-0,73***	-0,31
	2	0,11	0,09	-0,19	-0,31	-0,11	0,42
Março	1	0,14	0,07	0,25	0,07	0,21	0,21
	2	0,08	0,35	-0,24	0,05	-0,55**	0,66**
Abril	1	-0,07	0,04	-0,17	-0,16	-0,29	0,04
	2	0,03	-0,25	-0,32	-0,14	-0,32	0,01

(1) Fronteira Oeste; (2) Campanha; (3) Depressão Central; (4) Planície Interna; (5) Planície Externa; (6) Zona Sul. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

TABELA 19. Coeficientes de correlação de Pearson entre a temperatura mínima absoluta do ar (Tminabs) mensal e os rendimentos corrigidos de grãos de arroz irrigado, das regiões orizícolas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.

Tminabs	Região					
	1	2	3	4	5	6
Setembro	0,07	-0,01	-0,20	-0,28	-0,39	-0,66**
Outubro	0,29	-0,19	0,08	0,20	0,53*	0,19
Novembro	-0,48*	-0,44*	-0,50	-0,45*	-0,71**	-0,29
Dezembro	-0,42	-0,33	-0,37	-0,39	0,04	0,13
Janeiro	-0,30	-0,36	-0,36	-0,61**	-0,32	-0,26
Fevereiro	0,05	0,03	-0,19	-0,57**	-0,57**	0,14
Março	0,06	0,31	0,18	0,05	-0,17	0,75***
Abril	0,00	-0,057	-0,31	-0,21	-0,28	-0,12

(1) Fronteira Oeste; (2) Campanha; (3) Depressão Central; (4) Planície Interna; (5) Planície Externa; (6) Zona Sul. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

4.3.3 Modelos de estimativa de rendimento de grãos de arroz

4.3.3.1 Ajuste dos modelos

As equações de regressão linear múltipla, para cada região orizícola e para o Estado como um todo, ajustadas através da seleção livre de variáveis independentes (*stepwise*), são apresentadas na Tabela 20. Os coeficientes de determinação (R^2) do período de ajuste dos modelos para as diferentes regiões variaram entre 0,75 e 0,96.

Pode-se perceber que foram incluídas nos modelos diferentes combinações de variáveis agrometeorológicas e espectrais em cada região, com exceção da Campanha. Embora, nesta região tenham sido incluídas apenas variáveis espectrais ($NDVI_{Fev1}$ e $NDVI_{Mar2}$) o coeficiente de determinação da equação foi de 0,75, ou seja, estas variáveis explicaram 75% do rendimento de grãos no período analisado.

TABELA 20. Modelos para estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustados através de regressão linear múltipla, para as regiões orizícolas e para o Estado do Rio Grande do Sul, a partir de dados agrometeorológicos e espectrais. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.

Região	Modelo - abordagem 1	R ²	Significância	Erro Padrão (t ha ⁻¹)
1	$Y = 27,78 - 36,93NDVI_{Nov1} - 0,31Tminabs_{Dez1} - 0,13Tminabs_{Fev2}$	0,93	0,001	0,279 (4%)*
2	$Y = 12,00 + 8,42NDVI_{Set1} - 15,19NDVI_{Mar2}$	0,75	0,008	0,417 (7%)*
3	$Y = -9,99 + 21,46NDVI_{Fev1} - 0,10 Tminabs_{Mar1}$	0,76	0,013	0,421 (7%)*
4	$Y = -5,77 + 6,37 NDVI_{Jan2} + 0,001Ra_{Jan1}$	0,88	0,001	0,221 (4%)*
5	$Y = -7,38 - 12,51NDVI_{Nov1} + 6,13 NDVI_{Dez2} + 16,78 NDVI_{Fev2} + 0,10Tminabs_{Nov2}$	0,95	0,005	0,249 (4%)*
6	$Y = 13,66 - 9,63NDVI_{Nov2} - 4,00 NDVI_{Dez1} + 11,66 NDVI_{Dez2} - 0,001Ra_{Jan1}$	0,96	0,001	0,199 (3%)*
RS	$Y = 3,66 - 6,57NDVI_{Nov1} + 2,13 NDVI_{Dez2} + 0,16Tminabs_{Out2}$	0,70	0,001	0,445 (7%)*

Região: 1 Fronteira Oeste, 2 Campanha, 3 Depressão Central, 4 Planície Interna, 5 Planície Externa, 6 Zona Sul;

Modelo: Y é o rendimento estimado de grãos de arroz irrigado (t.ha⁻¹); Ra refere-se à radiação solar; Tminabs refere-se à temperatura mínima absoluta do ar; os caracteres seguintes correspondem ao período da análise.

* Representa o erro padrão em porcentagem relativa ao rendimento oficial de grãos de arroz irrigado.

Nos modelos ajustados foram selecionadas apenas um tipo de variável agrometeorológica combinada aos dados espectrais para as diferentes regiões e para o Estado. A variável temperatura mínima absoluta do ar foi incluída nos modelos referentes às regiões Fronteira Oeste, Depressão Central e Planície Externa. Os períodos considerados compreenderam, principalmente, o estágio reprodutivo da cultura. Neste estágio a ocorrência de temperaturas muito baixas está associada negativamente ao rendimento de grãos, sendo que utilizada como um dos critérios para o zoneamento agroclimático por épocas de semeadura para a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Steinmetz *et al.*, 2007).

No que se refere à radiação solar somente na Planície Interna e Zona Sul foram inseridos dados correspondentes aos primeiros dezesseis dias de janeiro (Ra_{Jan1}). A não inclusão desta variável nos modelos das demais regiões é coerente, devido a forte associação entre esta variável e os dados espectrais conforme o demonstrado por Klering *et al.* (2010). Assim, a inclusão dos dados NDVI acaba por explicar boa parte do rendimento de grãos em função do acúmulo de biomassa verde estar atrelado, entre outros fatores, à disponibilidade de radiação solar.

As melhores estimativas foram obtidas na Planície Externa e Zona Sul sendo os coeficientes de determinação de 0,95 e 0,96, respectivamente. Nestas regiões os modelos ajustados incluíram dados espectrais de diversas etapas, indicando que o monitoramento do perfil espectro-temporal pôde explicar grande parte da variabilidade do rendimento de grãos nas safras analisadas. Resultados semelhantes, no entanto considerando todo o ciclo de

desenvolvimento da soja, foram obtidos por Mercante *et al.* (2010) e Lui & Kogan (2002).

No modelo ajustado para o Estado como um todo foram incluídos dados espectrais referentes aos estágios inicial ($NDVI_{Nov1}$) e de desenvolvimento vegetativo ($NDVI_{Dez2}$), e, dados de temperatura mínima absoluta do ar do período de implantação da cultura ($Tminabs_{Out2}$). O coeficiente de determinação foi de 0,70, com um erro padrão de $0,445 \text{ t ha}^{-1}$ (Tabela 20), o que representa 7% da média do rendimento de grãos do Rio Grande do Sul, no período analisado.

A partir da ideia da elaboração de um modelo conceitual, baseado na relação clima-planta conhecida desta cultura, para estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustaram-se novas equações de regressão linear múltipla (Tabela 21).

TABELA 21. Modelos orientados para estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustados através de regressão linear múltipla, para as regiões orizícolas e para o Estado do Rio Grande do Sul, a partir de dados agrometeorológicos e espectrais. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.

Região	Modelo - abordagem 2	R ²	Significância	Erro Padrão (t ha ⁻¹)
1	$Y = 24,43 - 26,81NDVI_{Nov1} - 9,17NDVI_{Jan1} + 5,51NDVI_{Jan2} - 7,16NDVI_{Mar1} + 0,05Tminabs_{Mar1}$	0,77	0,187	0,603 (9%)*
2	$Y = 1,03 - 13,34NDVI_{Nov1} - 0,40NDVI_{Jan1} + 15,32NDVI_{Jan2} - 4,77NDVI_{Mar1} + 0,16Tminabs_{Mar1}$	0,79	0,155	0,507 (8%)*
3	$Y = -9,94 - 16,62NDVI_{Nov1} - 1,96NDVI_{Jan1} + 11,20NDVI_{Jan2} + 19,29NDVI_{Mar1} + 0,05Tminabs_{Mar1}$	0,79	0,150	0,513 (9%)*
4	$Y = 7,34 - 0,61NDVI_{Nov1} + 2,25NDVI_{Jan1} + 1,80NDVI_{Jan2} - 3,41NDVI_{Mar1} - 0,11Tminabs_{Mar1}$	0,60	0,250	0,540 (9%)*
5	$Y = -2,27 - 4,61NDVI_{Nov1} + 5,92NDVI_{Jan1} + 4,17NDVI_{Jan2} + 6,14NDVI_{Mar1} - 0,11Tminabs_{Mar1}$	0,86	0,072	0,378 (7%)*
6	$Y = -0,38 - 10,65NDVI_{Nov1} + 2,62NDVI_{Jan1} + 14,28NDVI_{Jan2} - 4,41NDVI_{Mar1} + 0,05Tminabs_{Mar1}$	0,80	0,144	0,562 (9%)*
RS	$Y = 7,23 - 4,57NDVI_{Nov1} + 4,05NDVI_{Jan1} - 1,07NDVI_{Jan2} - 0,1NDVI_{Mar1} - 0,07Tminabs_{Mar1}$	0,45	0,002	0,673 (11%)*

Região: 1 Fronteira Oeste, 2 Campanha, 3 Depressão Central, 4 Planície Interna, 5 Planície Externa, 6 Zona Sul;

Modelo: Y é o rendimento estimado de grãos de arroz irrigado (t.ha⁻¹); Ra refere-se à radiação solar; Tminabs refere-se à temperatura mínima absoluta do ar; os caracteres seguintes correspondem ao período da análise.

* Representa o erro padrão em porcentagem relativa ao rendimento oficial de grãos de arroz irrigado.

Nesta abordagem, a escolha das variáveis independentes se deu de maneira orientada, baseada no pressuposto de que informações sequenciais de NDVI indicam as condições reais de desenvolvimento das lavouras em termos de condições ambientais, tanto meteorológicas, como de práticas manejo, cultivares e condições de solo. Em tese, maiores valores de NDVI correspondem a um maior acúmulo de biomassa, e, o acúmulo desta está relacionado a um maior rendimento de grãos. No entanto, após o máximo acúmulo de biomassa verde, o rendimento pode ser penalizado em função da ocorrência de elementos agrometeorológicos adversos aos processos de formação e enchimento do grão.

Dentro deste contexto, definiram-se as variáveis independentes para o ajuste dos modelos de estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado. Levou-se em conta, também, os coeficientes de correlação de Pearson coerentes com as associações, encontradas na revisão bibliográfica, entre o rendimento de grãos e as variáveis espectrais e agrometeorológicas (Tabelas 13 até 20). Assim, foram incluídas as variáveis: $NDVI_{Nov1}$, $NDVI_{Jan1}$, $NDVI_{Jan2}$, $NDVI_{Mar1}$ e $Tminabs_{Mar1}$.

A melhor estimativa foi obtida para a região da Planície Externa, onde o conjunto de dados utilizados explicou 86% da variabilidade dos rendimentos. O erro padrão das estimativas foi de $0,378 \text{ t ha}^{-1}$, representativo de 7% do rendimento de grãos observados. A pior estimativa foi observada na região da Planície Interna, onde se obteve um coeficiente de determinação de 0,60 e um erro padrão de 9% com relação ao rendimento de grãos oficial ($0,540 \text{ t ha}^{-1}$).

O modelo ajustado para o Estado como um todo apresentou erro padrão de 11% entre o rendimento de grãos estimado e o oficial. No entanto, o

coeficiente de determinação foi baixo ($R^2=0,45$), fato relacionado às diferenças entre os rendimentos de grão oficiais nas diferentes regiões orizícolas.

Os gráficos de dispersão, entre os dados oficiais e estimados para as diferentes regiões orizícolas e para o Estado como um todo, nos períodos de ajuste dos mesmos, através das diferentes abordagens, são apresentados nas Figuras 31 a 33.

Nas regiões da Fronteira Oeste, Planície Externa e Zona Sul os modelos ajustados através da abordagem 1 geraram melhores estimativas de rendimento de grãos, em relação aos dados oficiais, do que os gerados a partir da abordagem orientada. Desempenhos muito próximos foram observados na Campanha e Planície Interna. Já as estimativas de rendimento de grãos geradas pelo modelo ajustado, através da abordagem orientada (abordagem 2), apresentaram melhores resultados do que as geradas pelo modelo da abordagem 1 na região Depressão Central.

As significâncias dos coeficientes de correlação entre os rendimentos de grãos oficial e estimado, gerados através das duas abordagens (Figuras 31 a 33), foram de 5% em todas as regiões, e também no Estado.

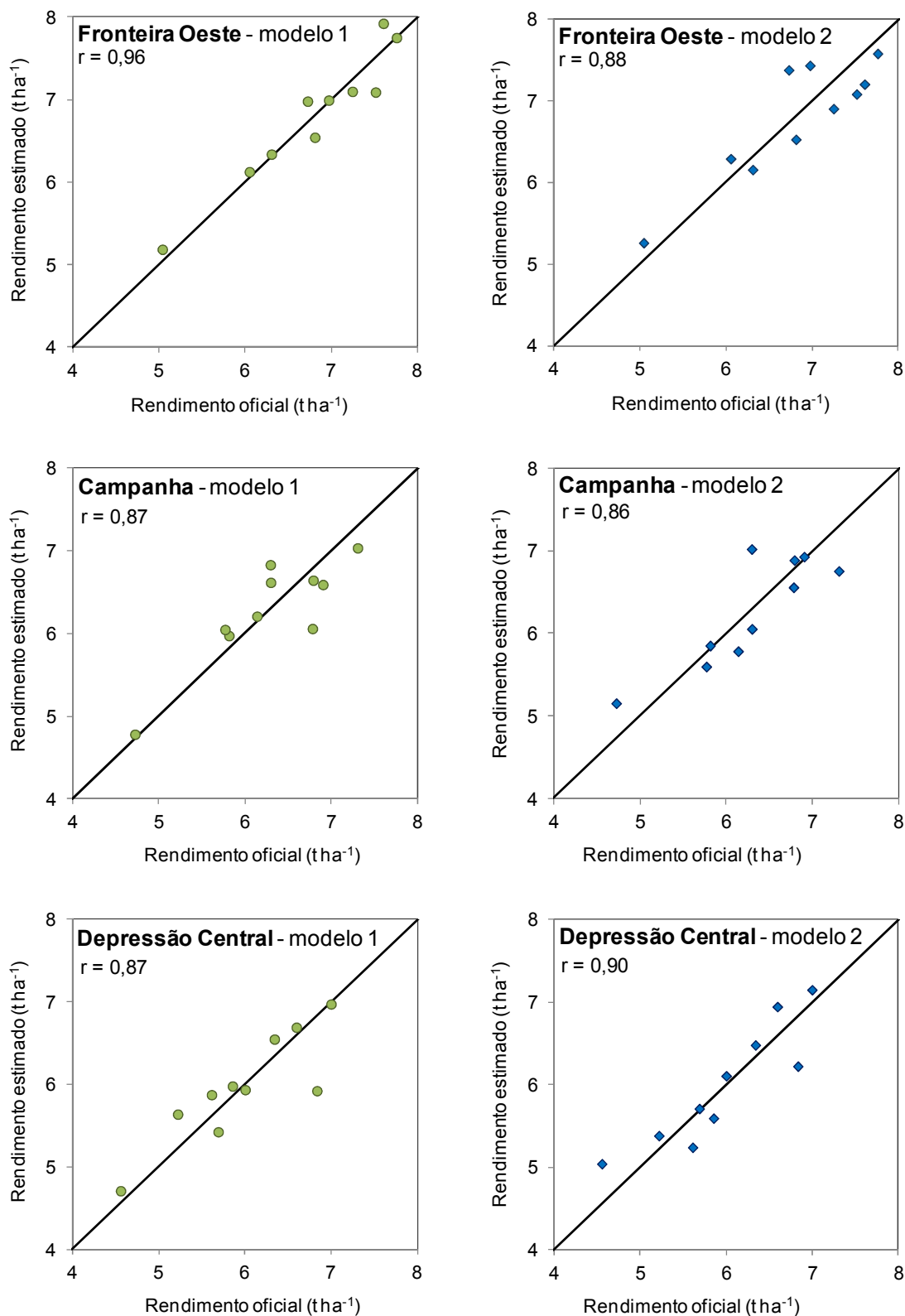


FIGURA 31. Dispersão de valores estimados e observados do rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustados através de diferentes abordagens, para as regiões Fronteira Oeste, Campanha e Depressão Central. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.

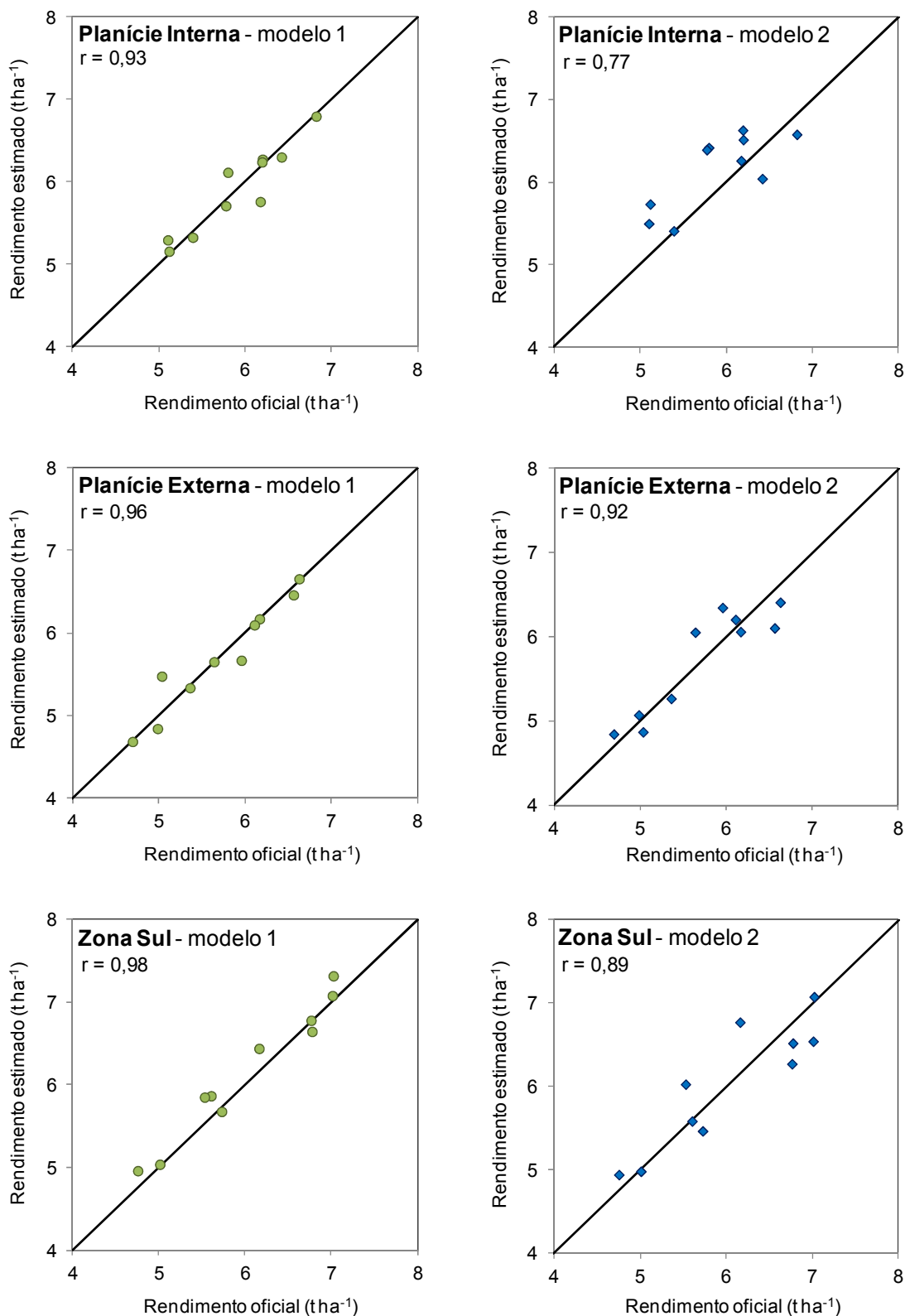


FIGURA 32. Dispersão de valores estimados e observados do rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustados através de diferentes abordagens, para as regiões Planície Interna, Planície Externa e Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.

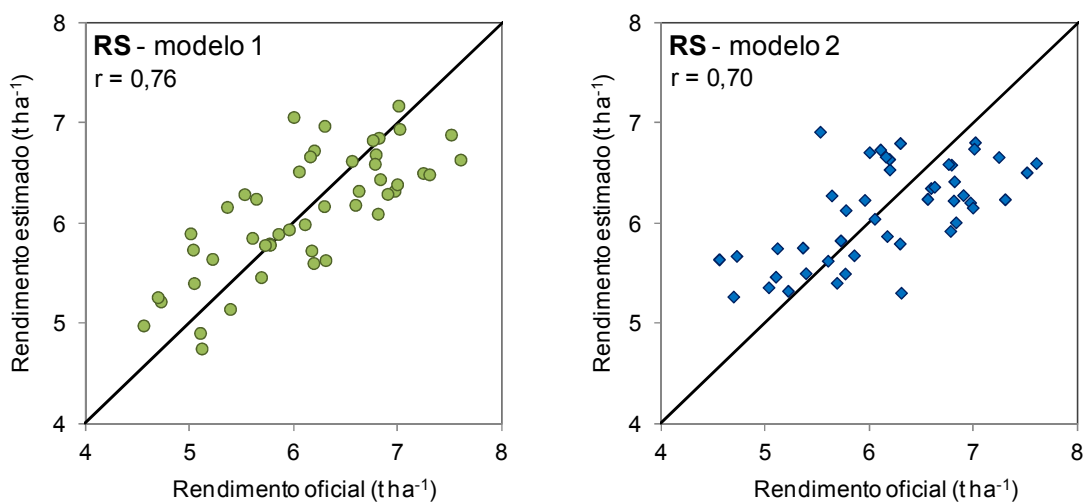


FIGURA 33. Dispersão entre os valores estimados e observados do rendimento de grãos de arroz irrigado, elaborados através de diferentes abordagens, para o Estado do Rio Grande do Sul, no período de ajuste. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.

Os modelos agrometeorológicos-espectrais para estimar o rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustadas através das duas abordagens, são condizentes com a realidade espaço-temporal de todas as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Entretanto, as regressões lineares múltiplas ajustadas têm caráter empírico, e não devem ser utilizadas para condições distintas daquelas para as quais foram desenvolvidas.

Outro fator que deve ser considerado são os dados meteorológicos utilizados para o ajuste dos modelos. Em função das poucas estações meteorológicas com séries de observações contínuas, dentro do período de estudo, foram utilizados dados de no máximo quatro estações por região orizícola (Tabela 2). Mesmo assim, os resultados das estimativas de rendimento de grãos podem ser considerados satisfatórios. Entretanto, a caracterização das condições meteorológicas com maior detalhamento (maior

número de dados meteorológicos) pode tornar as estimativas de rendimento de grãos de arroz irrigado mais precisas.

Cabe ainda salientar características interessantes dos modelos ajustados através da abordagem orientada: consideram as relações clima-planta, o que confere coerência ao modelo, e necessitam de dados de entrada conhecidos, o que permite, a sua implementação em programas operacionais de previsão de safras. Em meados de março é possível ter a estimativa da produção de grãos, dada pelo produto do rendimento pela área cultivada. As características de baixo custo, devido à disponibilização gratuita de imagens MODIS, a facilidade de processamento, e, a menor subjetividade das estimativas também contribuem para tanto.

4.3.3.2 Teste

No período de teste, com dados independentes, observa-se através da análise da Figura 34, bom desempenho de ambos os modelos ajustados para o Estado como um todo, livre e orientado. Foram obtidos coeficientes de correlação entre o rendimento de grãos estimado e o oficial de 0,84 e 0,63, respectivamente.

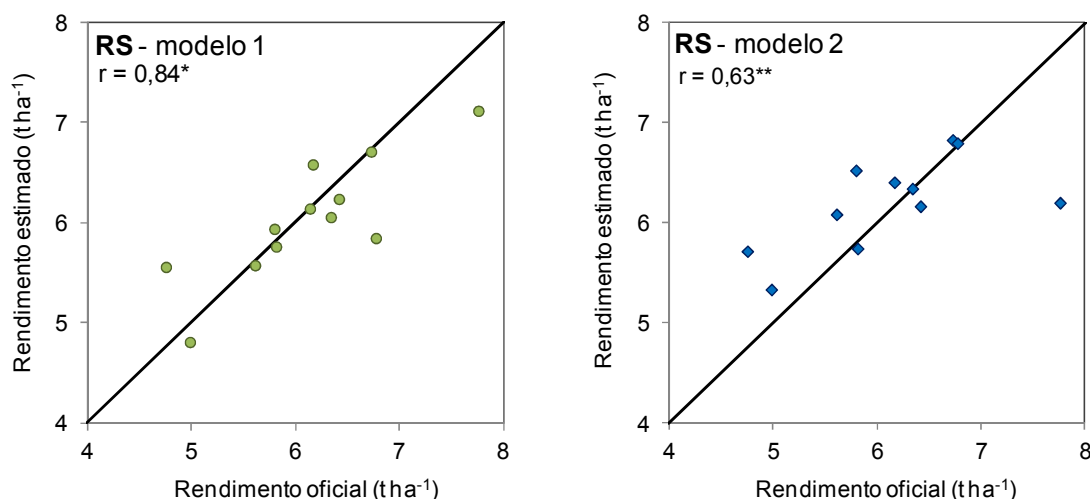


FIGURA 34. Dispersão entre os valores estimados e observados do rendimento de grãos de arroz irrigado, elaborados através de diferentes abordagens, para o Estado do Rio Grande do Sul, no período de teste. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste *t-Student*; ** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste *t-Student*.

O modelo agrometeorológico-espectral, ajustado através da abordagem orientada (modelo 2), apresentou leve tendência de superestimativa do rendimento de grãos de arroz irrigado com relação aos dados oficiais. O valor subestimado que apresentou maior distância da reta 1:1, e que determinou a redução do coeficiente de correlação de 0,84 para 0,63 no modelo 2 para o Estado, foi o maior rendimento observado durante o período de estudo. Assim, em virtude dos pontos utilizados para o teste dos modelos terem sido sorteados de forma aleatória, este acabou ficando fora dos dados considerados para o ajuste dos modelos considerando o Estado como um todo.

Entretanto, a capacidade preditiva do modelo foi investigada através da comparação com dados oficiais, os quais também são gerados por estimativas de área cultivada e produção divulgadas pelo IBGE. É importante salientar que tanto os dados oficiais quanto os gerados por modelos correspondem a estimativas, sendo assim, é esperado que mostrassem discrepâncias. Quando

ambas estimativas se aproximam, a chance de acerto é maior. Quando há discrepância, fica a dúvida de qual estimativa é mais aproximada da realidade do campo.

5 CONCLUSÕES

A partir das análises feitas neste trabalho conclui-se que:

Existem diferenças acentuadas entre as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul quanto às estatísticas agrícolas da cultura do arroz irrigado. A Fronteira Oeste apresenta os maiores valores de área cultivada, produção e rendimento de grãos de arroz irrigado. Já a região Planície Externa à Lagoa dos Patos apresenta os menores valores das mesmas estatísticas.

Foi constatada a existência de tendência tecnológica de incremento nos rendimentos de grãos de arroz irrigado, tanto no Estado como um todo, quanto nas seis regiões orizícolas. A variabilidade interanual do rendimento corrigido de grãos está atrelada às condições meteorológicas ocorridas.

A metodologia proposta para determinar a distribuição espacial e quantificar as áreas cultivadas com arroz irrigado, baseada no comportamento espectro-temporal da cultura, é eficiente, e pode ser usada para fornecer dados de entrada em modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

Os perfis temporais de NDVI/MODIS obtidos, das áreas cultivadas com arroz irrigado, são típicos de áreas agrícolas e indicaram associação com as principais etapas de desenvolvimento da cultura. Os perfis médios são muitos semelhantes em todas as regiões orizícolas.

Existem diferenças entre os perfis temporais representativos de safras de ocorrência de El Niño e La Niña, provavelmente associadas às condições meteorológicas características do fenômeno ENOS, e, assim estes perfis podem ser utilizados como indicativo da variabilidade climática interanual.

Não foi constada existência de tendência significativa nas séries temporais de NDVI/MODIS quando considerado todo o período de cultivo (setembro a abril). Existe tendência temporal significativa de decréscimo, em nível mensal, apenas em novembro em todas as regiões orizícolas.

As variáveis radiação solar, temperatura mínima absoluta do ar e NDVI estão associadas ao rendimento de grãos de arroz irrigado, em diversos períodos do desenvolvimento da cultura.

Os modelos agrometeorológicos-espectrais para estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado, ajustados através da abordagem orientada pelas relações clima-planta, são adequados às estimativas em nível regional e podem introduzir objetividade ao sistema atual de previsão de safras. No entanto, o modelo elaborado para o Estado como um todo ainda necessita de melhorias.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, B. S. et al. Avaliação de técnicas de processamento digital de imagens para a estimativa de áreas de arroz irrigado: um estudo de caso no município de Santa Vitória do Palmar/RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005, p.3961-3966.

ARAÚJO, G. K. D. **Determinação e mapeamento do início do ciclo para culturas de verão no estado do Paraná por meio de imagens de satélite e dados de precipitação.** 2010. 141f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

ASSAD, E. D. et al. Sistema de previsão da safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.5, p.615-625, 2007.

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

BARROS, M. G. M.; LUIZ, A. J. B.; EPIPHANIO, J. C. N. Segmentação multitemporal de imagens em áreas agrícolas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001, p.23-25.

BAZGEER, S. et al. Pre-harvest wheat yield prediction using agromet-spectral-trend-yield models for Hoshiarpur and Rupnagar district of Punjab. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, Ahmedabad, v.34, n.3, p.269-277, 2006.

BERGAMASCHI, H. **Fenologia.** Disponível em: <www.ufgrs.br/agropfagrom/disciplinas/502/fenolog.doc> Acesso em: 10 de mar. 2012.

BERLATO, M. A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul.** 1987. 103f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987.

BERLATO, M. A.; CORDEIRO, A. P. A. **Variabilidade Climática e Agricultura do Rio Grande do Sul**. In: AS ESTIAGENS e as Perdas na Agricultura: Fenômeno Natural ou Imprevidência?. Esteio: FEDERACITE, 2005. p. 43-58.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Nina: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura**. 1ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003, 110p.

BOARD, J.E.; PETERSON, M.L.; NG, E. Floret sterility in a cool environment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, p. 483-487, 1980.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potential and uses limitation of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, p. 704-716, 1996.

BOSCHETTI, M. et al. Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.30, n.18, p.4643-4662, 2009.

BRAGA, H. J. **Previsão agrícola: uma nova abordagem**. 1995. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1995. Disponível em: <www.eps.ufsc.br/teses/braga/index>. Acesso em: 5 mai. 2012.

CANTRELL, R. **Arroz: por quê é tão essencial para a segurança e estabilidade global**. Perspectivas Econômicas, publicação eletrônica do Departamento de Estado dos Estados Unidos, v.7, n.2, p.22-25, 2002.

CARMONA, L. C. **Efeitos associados aos fenômenos El Niño e La Niña no rendimento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul**. 2001. 75f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CARMONA, L. C.; BERLATO, M. A. El Niño e La Niña e o rendimento de grãos de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.147-152. 2002.

CARMONA, L. C.; BERLATO, M. A.; BERGONCI, J. I. Relação entre elementos meteorológicos e rendimento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.2, p.289-294. 2002.

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

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

CHEN, J.; HUANG, J.; HU, J. Mapping rice planting areas in southern China using the China Environment Satellite data. **Mathematical and Computer Modelling**, Oxford, V.54, p-1037-1043, 2011.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**, 3ª ed. Madrid: Ediciones Rialp, 1996, 568p.

COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 3, n. 3, p. 175-183, 1974.

CONAB - Companhia Nacional Abastecimento. **Projeto GeoSafras**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1079&t=2>. Acesso em: 6 mai. 2012a.

CONAB. Companhia Nacional Abastecimento. **Levantamentos de Safra**. 2010. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/3105b7579c30b75639a0d4d319f94be1..pdf>>. Acesso em: 6 mai. 2012.

CONAB. Companhia Nacional Abastecimento. **Levantamentos de Safra**. 2012. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_06_12_16_15_32_bol_etim_portugues_junho_2012.pdf>. Acesso em: 6 mai. 2012b.

CONGALTON, R.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data of remotely sensed data: Principles and Practices**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999, 137p.

CORDEIRO, A. P. A. **Tendências climáticas das variáveis meteorológicas originais, estimadas e das derivadas do balanço hídrico seriado do Rio Grande do Sul**. 2010. 274f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. L., A Uniform and adaptative system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v.40, n.2, p.436-443, 2000.

CRUSCO, N. A. **Sensoriamento remoto para análise multitemporal da dinâmica de áreas agrícolas**. 2007. 105f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

CRUZ, R. P. **Exigências climáticas para a cultura do arroz irrigado**. Cachoeirinha: IRGA - Estação Experimental, Seção de Melhoramento Genético, 2010. 38p.

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

D'ARCO, E.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R. **Índice de vegetação para estimativa de área plantada com arroz irrigado**. In: O SENSOR MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: Parêntese. 2007. Cap. 9, p. 123-131.

DEMMATTÊ, J. A. M.; TOLEDO, A. M. A.; SIMÕES, M. S. Metodologia para reconhecimento de três solos por sensores: laboratorial e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5., 2004.

DEPPE, F. et al. Monitoramento da evolução temporal de cultivos agrícolas através de imagens TERRA/MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 145-152.

DOURADO-NETO, D. A. et al. Principles of crop modeling and simulation: Uses of mathematical science. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.55, p.46-50, 1998.

DRAPER, N.R.; SMITH, R. **Applied regression analysis**. 3rd ed. New York: Wiley, 1996. 706p.

DUTRA, L. V. et al. **Análise automática de imagens multiespectrais**. São José dos Campos: INPE, 1981. 40p.

DUY, P. Q. et al. Analysis of the matter production process related to yield and yield components of rice plants grown under the practice of nitrogen free basal dressing accompanied with sparse planting density. **Plant Production Science**, Tokio, v.7, n.2, p.155-164, 2004.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Características da planta de arroz**. 2011. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fe75wint02wx5eo07qw4xeclygdut.html>>. Acesso em: 01 jun. 2012.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil**. 2005 Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/index.htm>>. Acesso em: 20 fev. 2012.

EPIPHANIO, J. C. N. **Dados TM Landsat-5 no estudo das culturas de trigo e feijão**. 1988. 141f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queirós, Universidade de São Paulo, Piracicaba: 1988.

EPIPHANIO, J. C. N. *et al.* **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992. 132 p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nation. **Trade and Markets**. Disponível em: < <http://www.fao.org/es/esc/en/15/70/index.html>>. Acesso em: 02 abr. 2012.

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nation. **Statistical databases**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>. Acesso em: 10 jan. 2012.

FIGUEIREDO, D. C. **Conceitos básicos de Sensoriamento Remoto**. 2005. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf. Acesso em: 3 mai. 2012.

FIGUEIREDO, D. C. Projeto Geosafras - aprimoramento metodológico das estimativas de safras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p.191-195.

FIORIO, P. R. **Dados radiométricos obtidos nos níveis terrestre e orbital na avaliação de solos**. 2002. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Eça de Queirós, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

FONTANA, D. C.; ALMEIDA, T. S. Climatologia do número de dias com precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, p.135-145, 2002.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 127-132, 1997.

FONTANA, D. C.; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, p.87-91, 1996.

FORMAGGIO, A. R. **Comportamento espectral de quatro solos do Estado de São Paulo nos níveis orbital, de campo e de laboratório**. 1983, 140f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1983.

FORMAGGIO, A. R. **Interação da radiação eletromagnética com os solos**. In: O SENSORIAMENTO remoto na agricultura: conceitos básicos, metodologia e aplicações. São José dos Campos: INPE, 1989. p. 31-52.

FREITAS, T. F. S. **Densidade de semeadura e adubação nitrogenada em cobertura na época de semeadura tardia de arroz irrigada**. 2007, 72f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

FUKAI, S. Phenology in rainfed lowland rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.64. n.1, p.51-60, 1999.

GRIMM, A., M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J.. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, Boston, v. 11, n. 1, p. 2863-2880, 1998.

GUPTILL, S. C, MORRISON, J. L. **Elements of Spatial Data Quality**. Elsevier Sci., U.K. 78p. Il. 1995.

HEINEMANN, A. B. et al. Evaluation of physiological traits in upland rice for adaptation to no-tillage system. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v.21, n.2, p.113-122, 2009.

HOLBEN, B. N.; TUCKER, C. J.; FAN, C. J. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 46, n. 5, p. 651-655, 1983.

HUANG, J. F. et al. Rice yield estimation using remote sensing and simulation. **Journal of Zhejiang University Science**, Hangzhou, v.3, p.461-466, 2002.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.83, n.1-2, p.195-213, 2002.

HUETE, A; JUSTICE. C.; LEEUWEN, W. V. **MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document**. 1999. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf> Acesso em: 12 jan. 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric>>. Acesso em: 12 jan. 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisas Agropecuárias**. 2ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 92p (Séries relatórios metodológicos).

IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz Irrigado. **Censo da Lavoura de arroz irrigado do Rio Grande do Sul - Safra 2004/05**. IRGA, 2006. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/index.php?principal=1&secao=999&id=124&menuP=124&key=3>>. Acesso em: 5 abr. 2012.

IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. **Informações & Mercado**. Disponível em: <<http://www.irga.gov.br>>. Acesso em: 04 fev. 2012.

IRRI - International Rice Research Institute. **World Rice Statistics**. Disponível em: http://www.irri.org/index.php?option=com_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=744&Itemid=100346&lang=en. Acesso em: 5 mar. 2012.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres**. Traduzido por José Carlos Neves Epiphany et al. 2. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p. (Tradução de: Remote sensing of the environment: an earth resources perspective.).

JONES, J. W. et al. **SOYGRO V5.4 - Technical documentation**. Gainesville: Agricultural Engineering Department and Agronomy Department University of Florida, 1987. 170p.

JUNGES, A. H. **Distribuição espacial e temporal do cultivo de trigo no Rio Grande do Sul e ajuste de modelo agrometeorológico-espectral para**

estimativa de rendimento de grãos. 2011. 173f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

JUSTICE, C. O. et al. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, n.1, p. 3-15, 2002.

KIMURA, R. et al. M. Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 69, n. 2, p. 83-100, 2004.

KLERING, E. V. **Avaliação do uso de imagens MODIS na modelagem agrometeorológica-espectral de rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.** 2007. 117f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KLERING, E. V. et al. Modelagem agrometeorológica do rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.5, p.549-558, 2008.

KLERING, E. V.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Relação entre a radiação solar global e o NDVI/MODIS na região orizícola do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2010. Belém do Pará. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2010.

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

KÖPPEN, W. **Climatología: con un estudio de los climas de la tierra.** Fondo de Cultura Económica. México. 479p, 1948.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. 1994. **Remote Sensing and Photo Interpretation**, 3rd. ed. John Wiley & Sons: New York. 750 p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation.** 4. ed. Madison : University of Wisconsin, 750 p, 1999.

LIU, W. T.; KOGAN, F. Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation condition indices. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.23, n.6, p.1161-1179, 2002.

LOPES, F.; BERLATO, M. A. Impactos do El Niño/La Niña nas temperaturas Médias Mínimas e Médias Máximas no Estado do Rio Grande do Sul. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12.; 2000, Porto Alegre, **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2000.

LOPES, F.; BERLATO, M. A. Relações entre a temperatura da superfície do mar da região do Niño 3.4 e a temperatura média mínima do estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA,

13.; 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2003.

LUDWIG, V. S. **A agroindústria processadora de arroz: Um estudo das principais características organizacionais e estratégicas das empresas líderes gaúchas.** 2004. 167f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Agronegócios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LUIZ, A. J. B.; EPIPHANIO, J. C. N. Amostragem por pontos em imagens de sensoriamento remoto para estimativa de área plantada por município. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p.111-118.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Arroz.** Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz>>. Acesso em: 15 mai. 2012.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction.** 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 292 p.

MERCANTE, E. et al. Modelos de regressão lineares para estimativa de produtividade da soja no oeste do Paraná, utilizando dados espectrais. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v.30, n.3, p.504-517, 2010.

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. **Technical Specifications**, 2003. Disponível em: <modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html> Acesso em: 26 mai. 2012.

MONTECINOS, A.; DIAZ, A.; ACEITUNO, P.; Seasonal diagnostic and predictability of rainfall in subtropical South America based on tropical Pacific SST. **Journal of Climate**, Boston, v.13, p.746-458, 2000.

MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.5, p.695-697, 1996.

MONTEITH, J. L. Does light limit crop production? **Physiological processes plant productivity**, Butterworths, London, 1981. p. 23-24.

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

MOREIRA, R. C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação.** 2000. 181f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

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

MOTA, F. S. Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a necessidade de irrigação do arroz em Pelotas (RS). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.8, n.1, p.151-154, 2000b.

MOTA, F. S. Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre o rendimento do arroz Irrigado na região de Pelotas (RS). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.15, n.2, p.21-24, 2000a.

MOTA, F. S. Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre o rendimento e a necessidade de irrigação do arroz na região de Pelotas (RS). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1., REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 23., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado 1999. p. 69-72

MOTA, F. S.; SILVA, J. B. Variabilidade do rendimento dos cereais, clima e tecnologia no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 8., 1993. **Anais...** Santa Maria: SOCIEDADE BRASILEIRA DE AGROMETEOROLOGIA, 1993. p.20.

MOTOHKA, T. et al. Evaluation of optical satellite remote sensing for rice paddy phenology in monsoon Asia using a continuous in situ dataset. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 0, n.17, p.4343-4357, 2009.

MOTTA, J. L. G.; FONTANA, D. C.; WEBER, E.. Verificação da acurácia da estimativa de área cultivada com soja através de classificação digital em imagens Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos:INPE, 2001.

MURATA, Y. On the influence of solar radiation and air temperature upon the local differences in the productivity of paddy rice in Japan. **International Rice Commission Newsletter**, v.15, p 20-30, 1966.

NAGLER, P. L.; DAUGHTRY, C. S. T.; GOWARD, S. N. Plant litter and soil reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.71, n. 2, p. 207-215. 2000.

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. **El Niño Southern Oscillation**. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/>> Acesso em: 12 fev. 2012.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto - Princípios e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989, 308p.

NOVO, E. M. L. M.; HANSON, J.D.; CURRAN, P.L. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.107, n. 7, p. 1283-1289, 1989.

OLDEMAN, L. R.; SESHU; D. V.; CADY, F.B. Response of rice to weather variables. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE IMPACT OF WEATHER PARAMETERS ON GROWTH AND YIELD OF RICE. 1986, Los Baños.

Weather and rice, proceedings... Los Baños: IRRI (International Rice Research Center), 1986. p.5-39.

OLIVEIRA, G. S. de. **El Niño e Você** – o fenômeno climático. São José dos Campos: Transtec, 2001. 116p.

PASSIOURA, J. B. Sense and nonsense in crop simulation. **Journal of the Australian Institute of Agricultural Science**, v. 39, p. 181-183, 1973.

PASSIOURA, J. B. Simulation models: Science, snake oil, education or engineering? **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.5, p. 690-694, 1996.

PATEL, N. K. et al. Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attributes. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 6, n. 5, p. 657-664, 1985.

PAX-LENNEY, M.; WOODCOCK, C. E. The effect of spatial resolution on the ability to monitor the status of agricultural. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.61, n.2, p.210-220, 1997.

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

PINHEIRO, B. da S. **Características morfológicas da planta relacionadas à produtividade**. In: A CULTURA do arroz no Brasil. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1000p.

PINO, F. A. Estatísticas agrícolas para o século XXI. **Agricultura em São Paulo**, v.46, n.2, p.71-105, 1999.

PINO, F. A. Estimação subjetiva de safras agrícolas. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.31, n.6, p.55-58, 2001.

PONTIUS, R. G. Quantification Error versus Location Error in Comparison of Categorical Maps. **Photogrammetry Engineering of Remote Sensing**, v.66, n.8, p.1010-1016, 2000.

PONZONI, F. J. **Comportamento Espectral da Vegetação**. In: SENSORIAMENTO remoto: reflectância de alvos naturais. Brasília: Universidade de Brasília, 2001. p.157-199.

PRASAD, A. K. et al. Use of vegetation index and meteorological parameters for the prediction of crop yield in India. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 28, n. 23, p. 5207-5235, 2007.

PROCÓPIO, S. O. et al. Desenvolvimento foliar da soja e do feijão e de plantas daninhas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.2, 2003.

PUCHALSKI, L. A. **Efeitos Associados ao El Niño e La Niña na Temperatura Média, Precipitação Pluvial e no Déficit Hídrico no Estado do Rio Grande do Sul**. 2000. 83f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-

graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

REIS, J. C. L.; SAIBRO, J. C. de. **Integração do arroz com pastagens cultivadas e pecuária**. In: ARROZ irrigado no Sul do Brasil. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, cap. 24, p. 831-859.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. Campbell, Australia: Springer-Verlag, 1993. 339 p.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2005. 121f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Estimativa da área de soja no Rio Grande do Sul por meio de imagens Landsat. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.57, n.3, p.226-234, 2005.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M. Estimativa da área de soja no Estado do Rio Grande do Sul por um método de amostragem. **Ciência Rural**, v.36, p.30-35, 2006.

ROPELEWSKI, C. H.; HALPERT, S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, Washington, v. 115, p. 1606–1626. 1987:

ROSSITER, D. G. Assessing the thematic accuracy of area-class soil maps. ITC: Enschede, 2001. Disponível em: www.itc.nl/~AccuracySoilMaps_PrePrint31Aug.2001.pdf. Acesso em: 5 jun. 2012.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.33, p.183-192. 1990.

RUDORFF, C. M. et al. **Classificação de soja pelo método de superfícies de resposta espectro-temporal**. In: O SENSOR MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: Parêntese. 2007. Cap. 8, p. 111-121.

SAKAMOTO, T. et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 96, n.1, p. 366–374, 2005.

SANCHES, I. D.; EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat. **Agricultura de São Paulo**, São Paulo, v.52, n.1, p.83-96, 2005.

SANTOS, J. S.; GEHRARDT, A.; FONTANA, D. C. Análise das Estimativas de Área de Soja no Estado do Rio Grande do Sul Geradas por Imagens

NDVI/MODIS Coleções 4 e 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009, p. 435-442.

SATAKE, T. Sterile-type cool injury in paddy rice plants. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Climate and rice**. Los Baños: IRRI, 1976. p. 281-300.

SESHU, D.V.; CADY, F.B. Response of rice to solar radiation and temperature estimated from international yield trials. **Crop Science**, v.24, p.649-654, 1984.

SETIONO, R.; KHENG, L. W.; ZURADA, J. M. Extraction of rules from artificial neural networks for nonlinear regression. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 13, n. 3, p. 564-577, 2002.

SHIBAYAMA, M.; AKIYAMAA, T. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.36, n.1, p.45-53, 1991.

SOARES, J. V. et al. **Histórico e Descrição**. In: O SENSOR MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: Parêntese. 2007. Cap. 1, p. 3-21.

SOMMER, S.; HILL, J.; MÉGIER, J. The potential of remote sensing for monitoring rural land use changes and their effects on soil conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 67, n. 3, p.197-209, 1998.

SOSBAI - Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Porto Alegre: SOSBAI, 2010, 188.p

SOUZA, G. S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear**. Brasília: EMBRAPA-SPI/EMBRAPA-SEA, 1998. 505p.

STEINMETZ, S. et al. **Clima**. In: A CULTURA do arroz no Brasil. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1100p

STEINMETZ, S. et al. **Macrozoneamento climático para o arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 20p.

STEINMETZ, S. et al. Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas do ar durante o período reprodutivo do arroz irrigado, na metade norte do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 107-121, 2003.

STEINMETZ, S. et al. Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas do ar prejudiciais à fecundação das flores de arroz em distintas regiões produtoras do estado do Rio Grande do Sul. **Agropecuária de Clima Temperado**, Pelotas, v. 4, n. 1, p. 63-77, 2001.

STEINMETZ, S. et al. Temperatura do solo favorável para o início da semeadura do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.15, n.2, p.99-104, 2009.

STEINMETZ, S. et al. **Zoneamento agroclimático do arroz irrigado por épocas de semeadura no Estado do Rio Grande do Sul (versão 4)**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007. 34p.

STEINMETZ, S. **Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. In: ARROZ irrigado no Sul do Brasil. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. 899p.

STEINMETZ, S.; AMARAL, A. G. **Mapeamento do risco de frio durante o período reprodutivo do arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2002. 19p.

STRECK et al. Avaliação da resposta ao fotoperíodo em genótipos de arroz irrigado. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.4, p.533-541, 2006.

TERRES, A. L. Melhoria de arroz irrigado por tolerância ao frio no Rio Grande do Sul, Brasil. In: REUNIÓN SOBRE MEJORAMIENTO DE ARROZ EN EL CONO SUR. 1989, Goiânia. **Mejoramiento de arroz**. Montevideo: IICA, 1991. p. 91-103.

TERRES, A. L.; GALLI, J. **Efeitos do frio em cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul - 1984**. In: Fundamentos para a cultura do arroz irrigado. Campinas: Fundação Cargill, 1985. Cap.6, p. 83-94.

THIRUVENGADACHARI, S.; SAKTHIVADIVEI, R. Satellite Remote Sensing for Assessment of Irrigation System Performance: A Case Study in India. In: INTERNATIONAL IRRIGATION MANAGEMENT INSTITUTE, Research Report 9, 1997. **Anais...** Colombo: INTERNATIONAL IRRIGATION MANAGEMENT INSTITUTE, 1997.

THORNLEY, J. H. M. **Mathematical models in plant physiology: a quantitative approach to problems in plant and crop physiology**. London: Academic Press, 1976. 318p.

TOMITA, A. et al. **Vegetation patterns in the Chao Phraya Delta, 1997 dry season using satellite image data**. In: Chao Phraya delta: Historical development, dynamics and challenges of Thailand's rice bowl, Bangkok, 2000. Disponível em: <http://std.cpc.ku.ac.th/delta/conf/Acrobat/Papers_Eng/Volume%201/Tomita.pdf>. Acesso em: fev 2012.

VAUGHAN, D. A. et al. Diversity in the Oryza genus. **Current Opinion in Plant Biology**, v.6: p.139-146, 2003.

WANG, Y. et al. Large-area rice yield forecasting using satellite imageries. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12, p. 27-35, 2010.

WEBER, E. et al. Estimativa de área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul na safra 2005/2006 através de imagens Landsat.. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p.465-472.

WHISLER, F. D. et al. Crop simulation models in agronomic systems. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 40, p. 141-208, 1986.

XIAO, X. et al. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data . **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 23, n. 15, p. 3009-3022, 2002.

XIAO, X. et al. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multitemporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**, New York, n.100, p. 95-113, 2006.

XIAO, X. et al. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 95, p. 480-492, 2005.

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

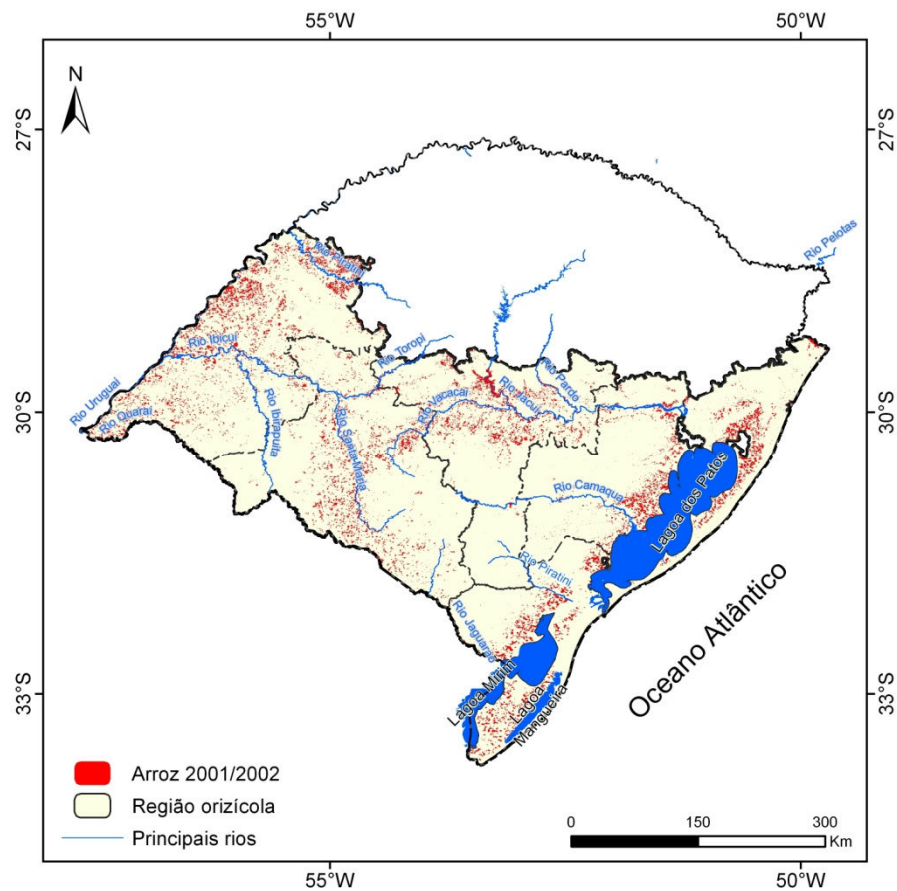
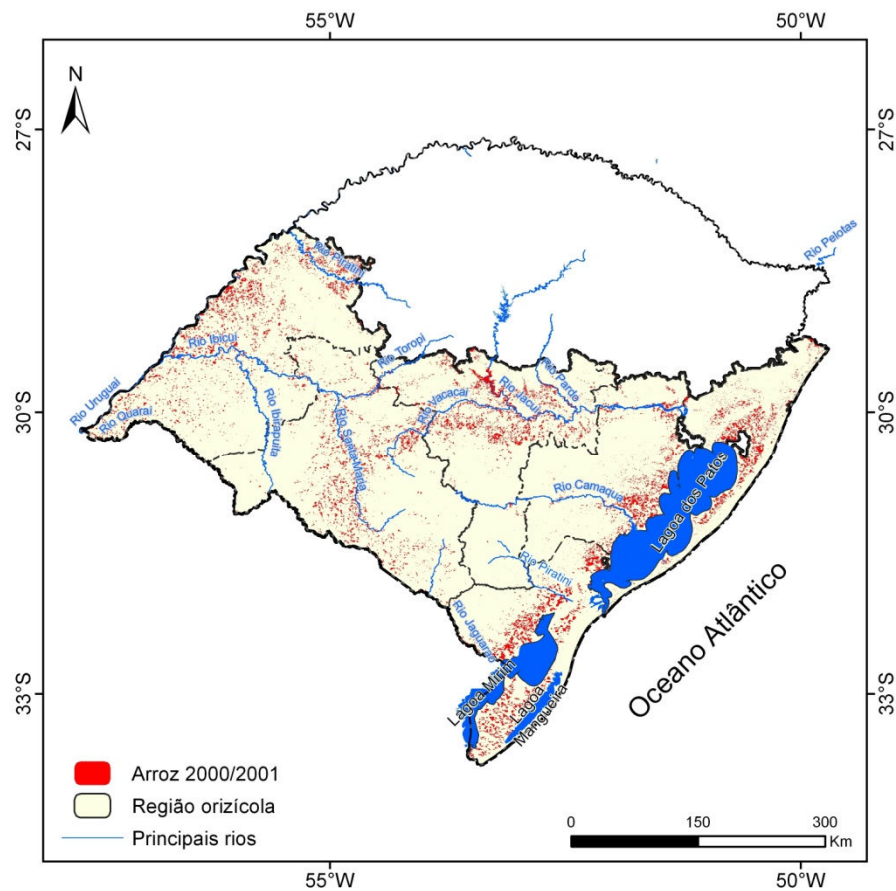
YOSHIDA, S.; PARAO, F. T. **Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics**. Philippines: IRRI (International Rice Research Center). 1976. p.471-494. 1976.

7 APÊNDICES

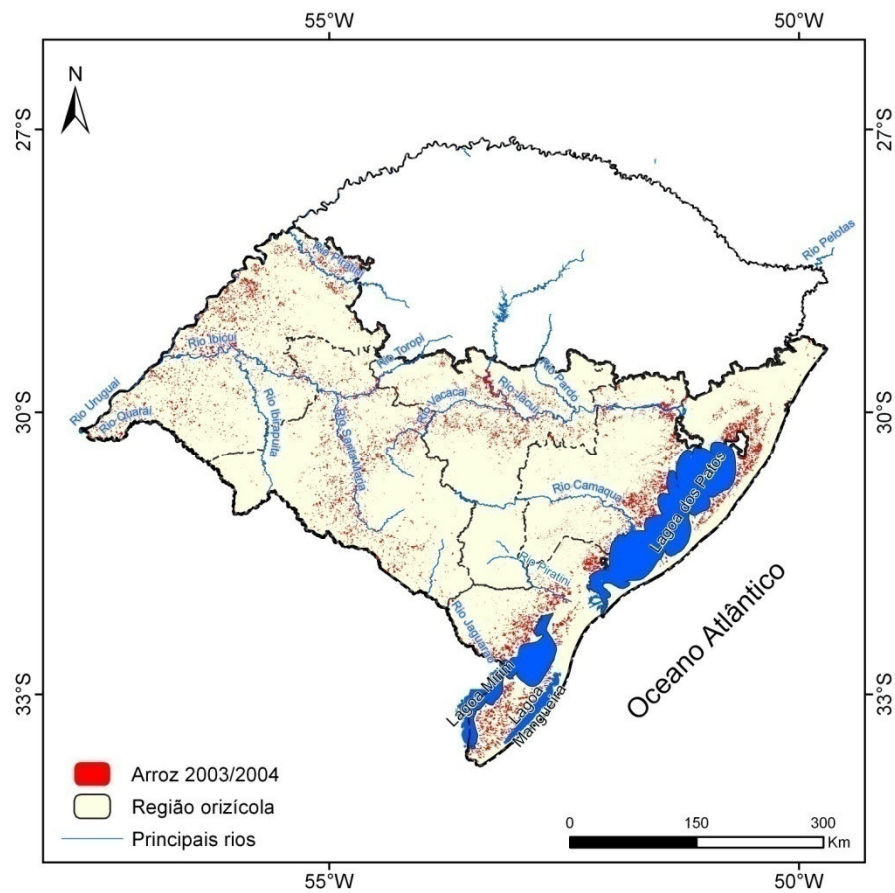
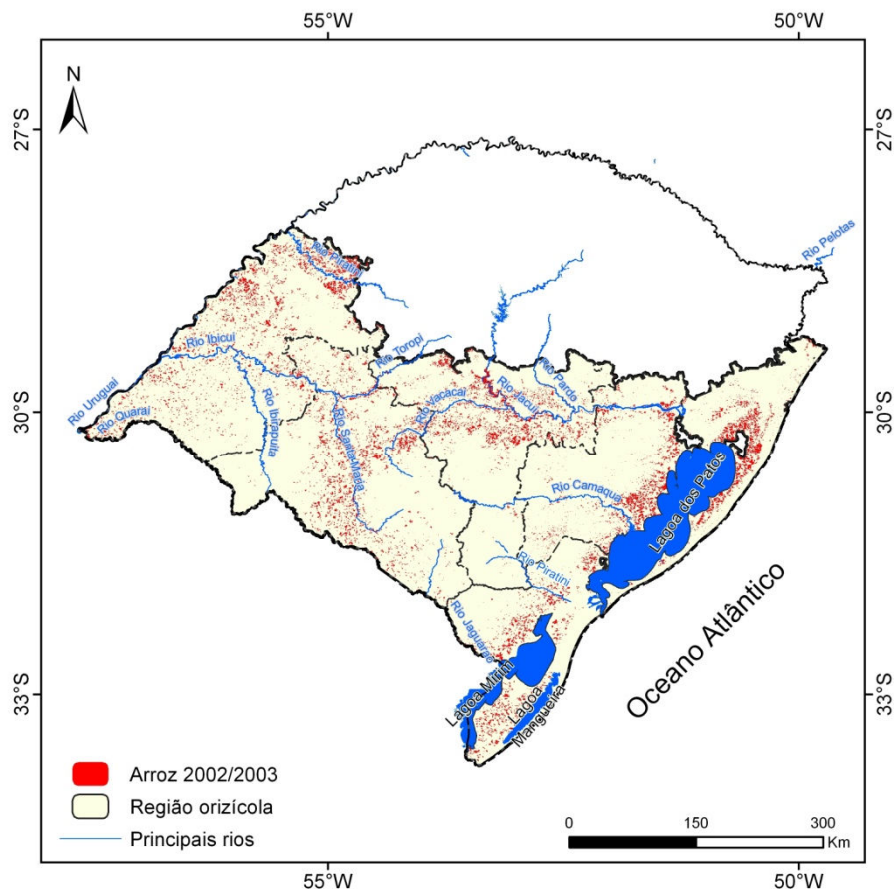
APÊNDICE 1. Coeficientes de inclinação da reta (β) ajustada às séries temporais de temperatura mínima (T_{min}) e radiação solar, para as diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas 2000/01 até 2009/10.

Região	T _{min}		Radiação solar	
	β	R ²	β	R ²
Fronteira Oeste	-0,0007	0,0001	4,3455	0,018
Campanha	0,0126	0,0294	2,7102	0,0054
Depressão Central	-0E ⁻⁰⁵	9E ⁻⁰⁷	1,5591	0,0015
Planície Interna	0,005	0,0053	4,8821	0,0201
Planície Externa	0,0065	0,0109	-0,8044	0,0003
Zona Sul	0,0073	0,0106	0,3680	0,0002

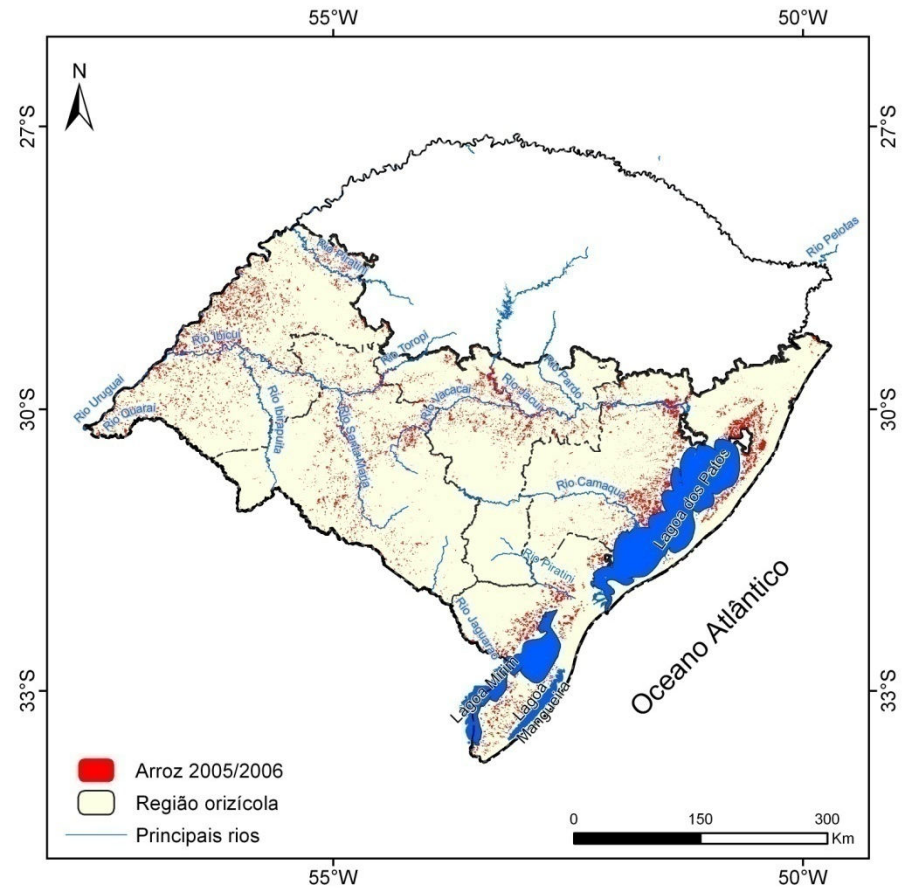
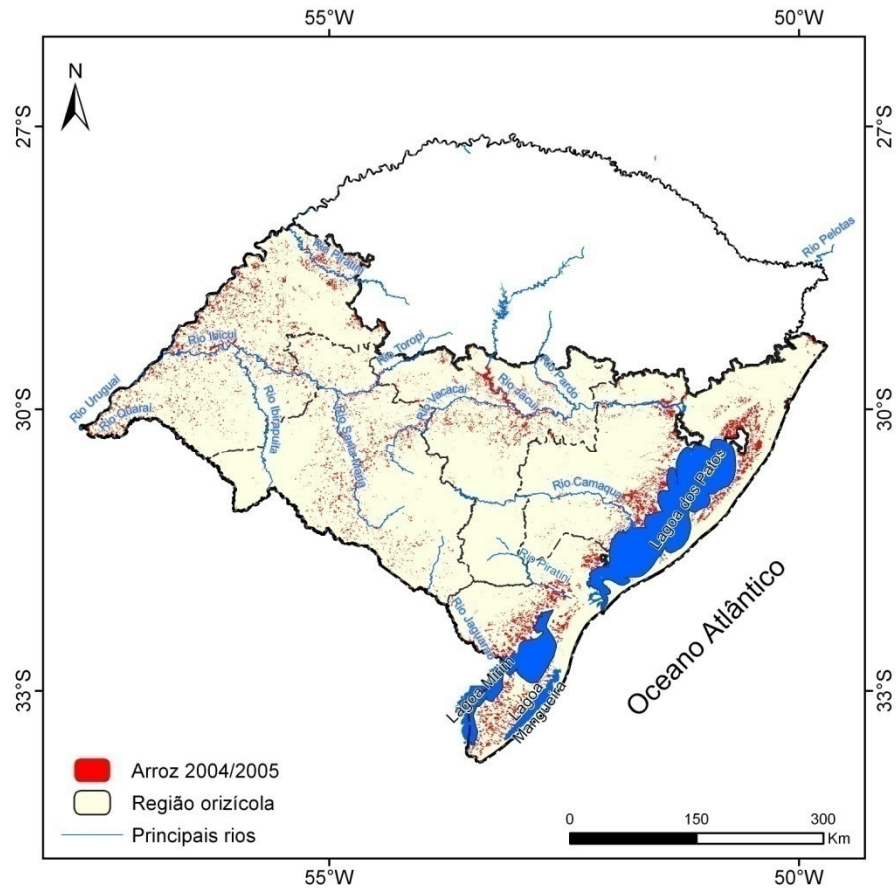
APÊNDICE 2. Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, na região orizícola do Rio Grande do Sul durante as safras de 2000/01 (a) e 2001/02 (b).



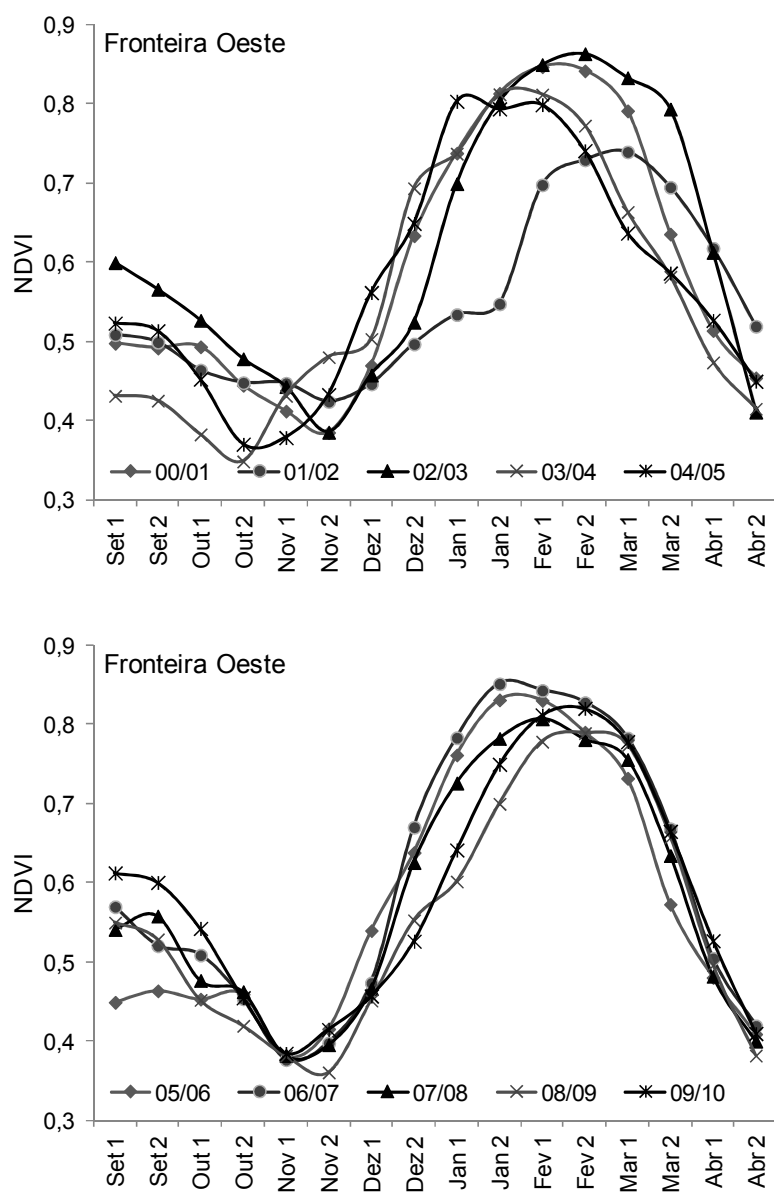
APÊNDICE 3. Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, na região orizícola do Rio Grande do Sul durante as safras de 2002/03 e 2003/04.



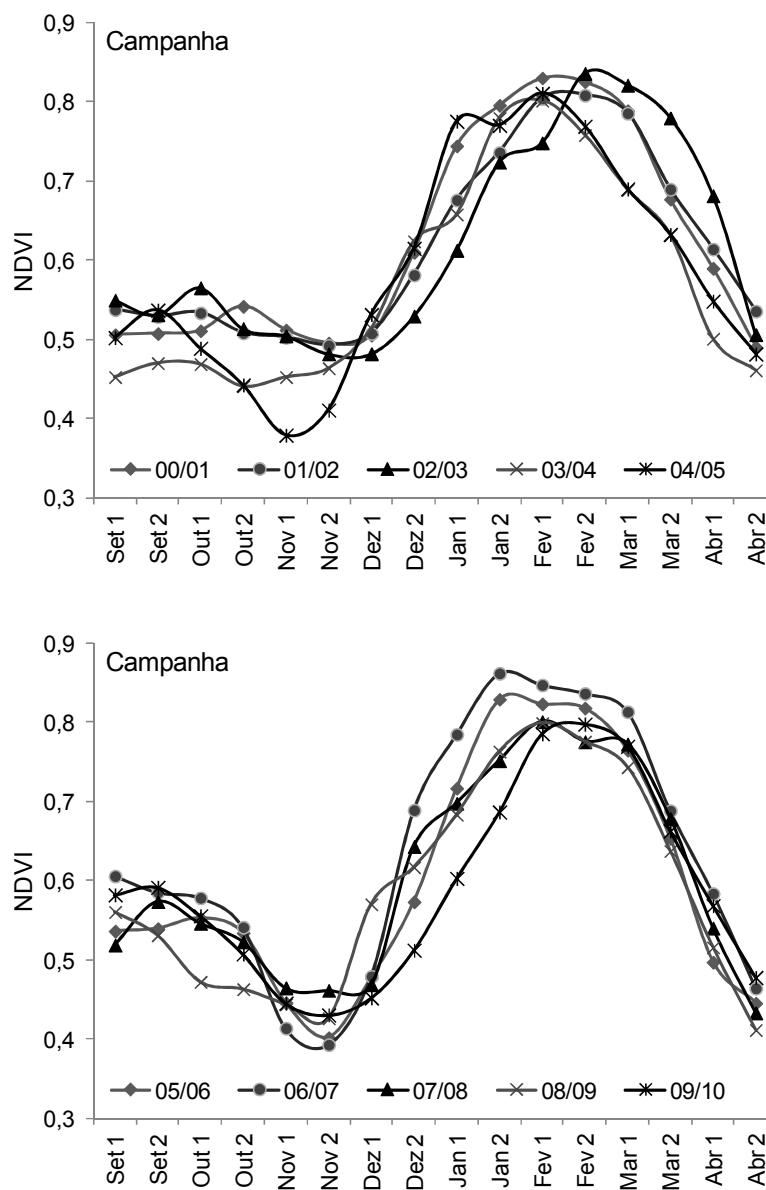
APÊNDICE 4. Distribuição espacial da área cultivada com arroz irrigado, estimada através de imagens MODIS, na região orizícola do Rio Grande do Sul durante as safras de 2004/05 e 2005/06.



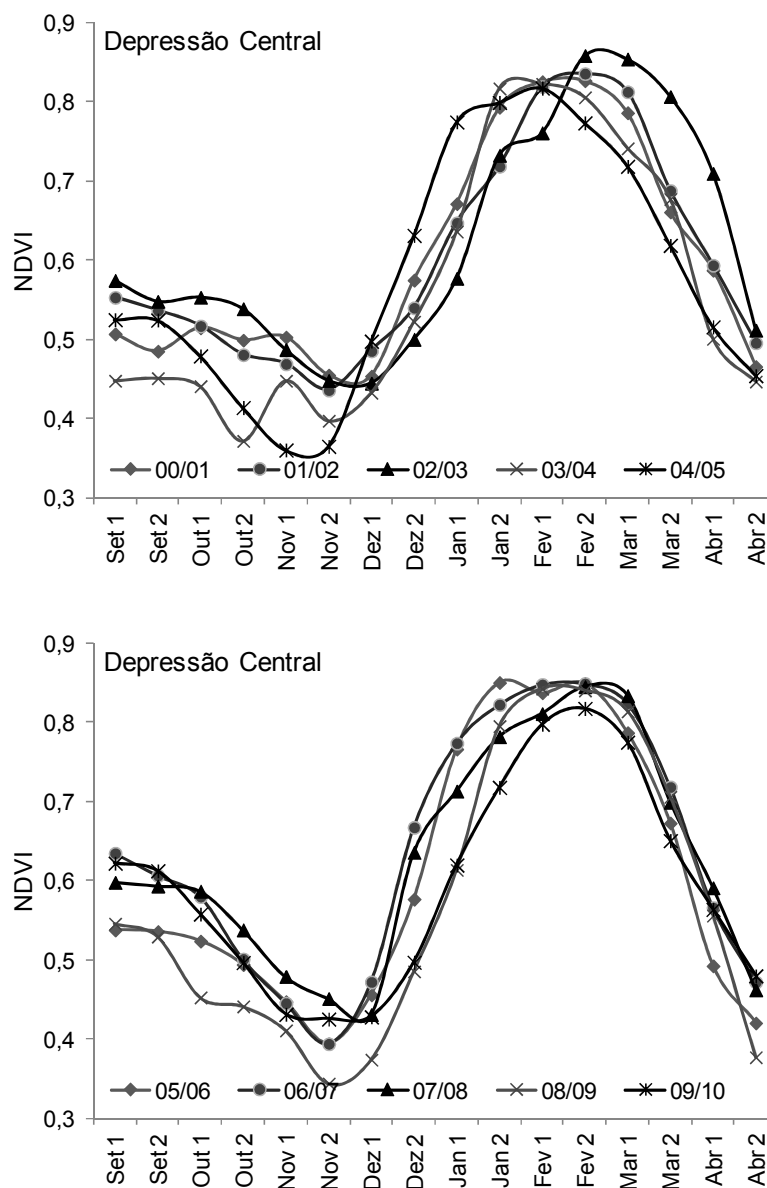
APÊNDICE 6. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Fronteira Oeste. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.



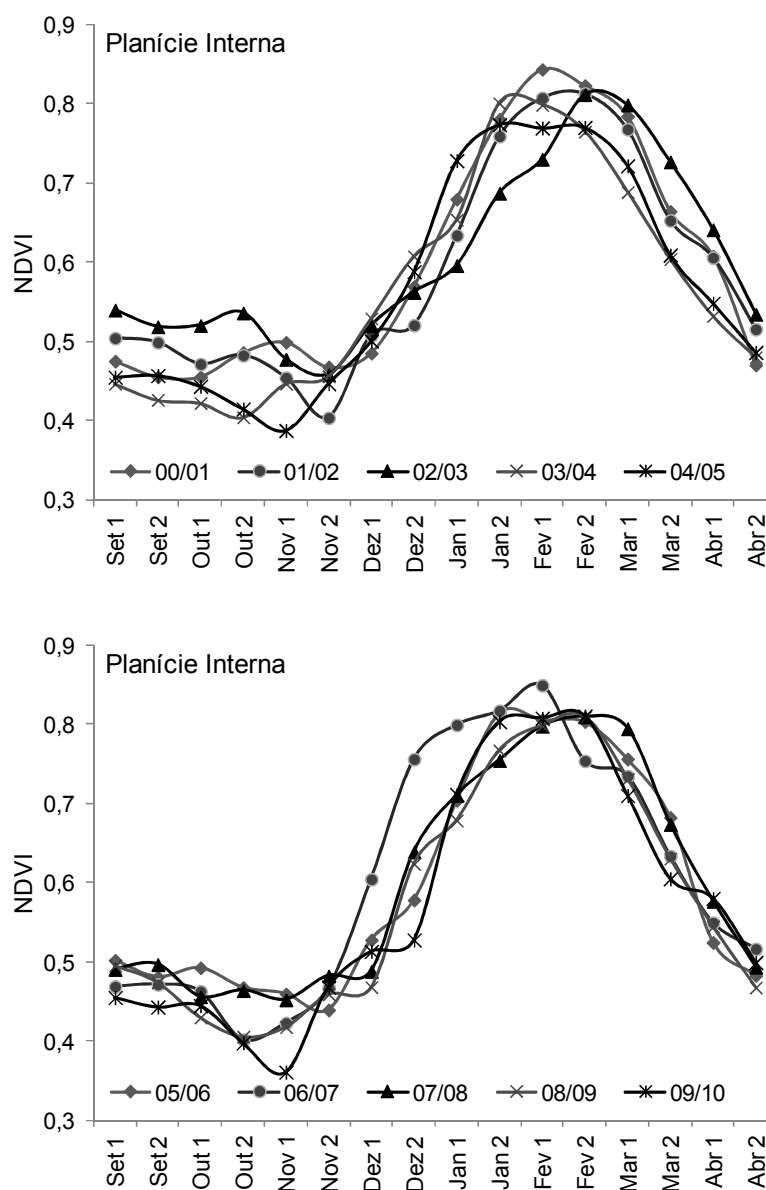
APÊNDICE 7. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Campanha. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.



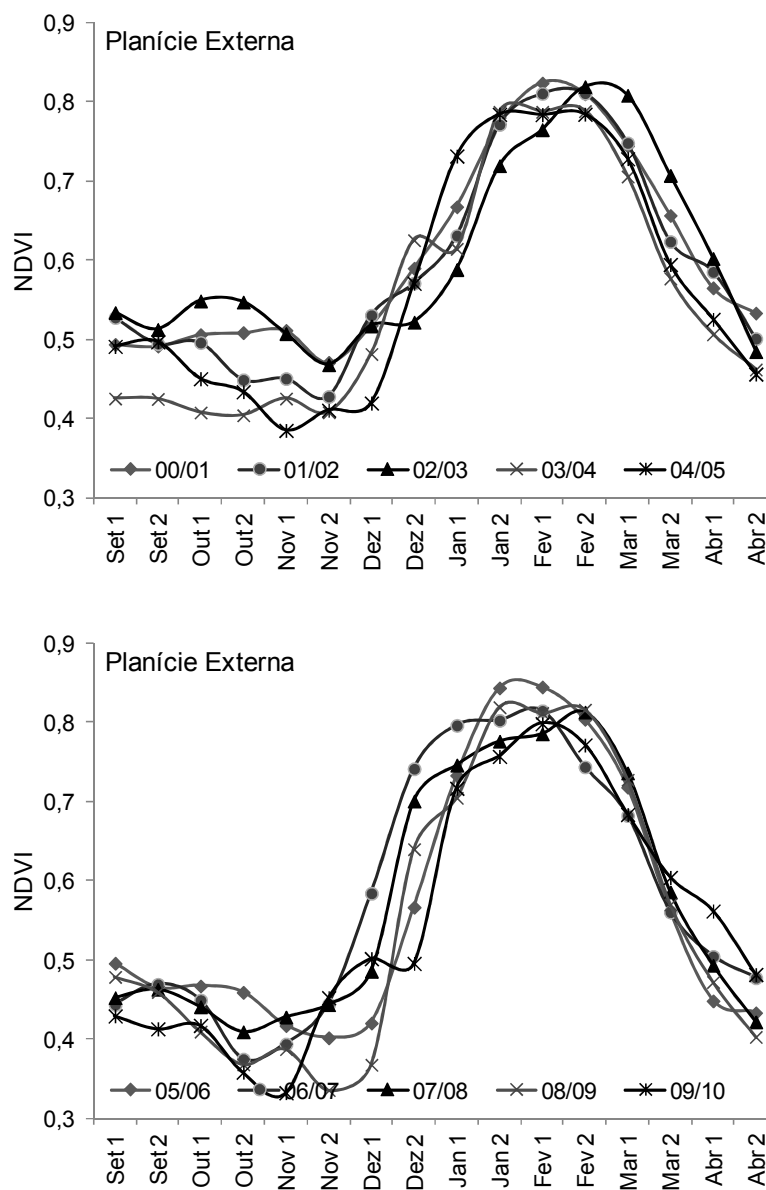
APÊNDICE 8. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Depressão Central. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.



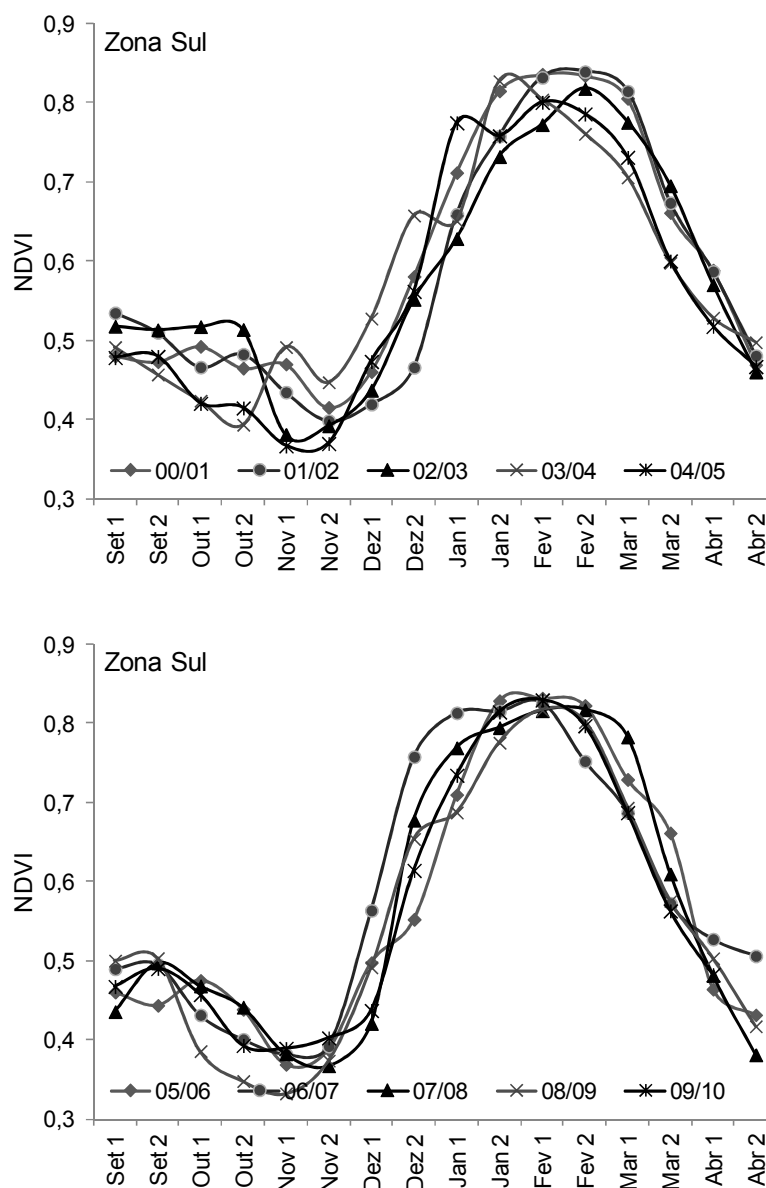
APÊNDICE 9. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Planície Interna. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.



APÊNDICE 10. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Planície Externa. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.



APÊNDICE 11. Perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas cultivadas com arroz irrigado na região Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10.



APÊNDICE 12. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Fronteira Oeste. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%

Fronteira Oeste		NDVI																
		Set		Out		Nov		Dez		Jan		Fev		Mar		Abr		
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2			
Radiação Solar	Set	1	0,35	0,29	0,33	0,02	0,03	0,00	-0,31	0,07	0,15	0,48	0,62**	0,72***	0,37	0,22	-0,20	-0,54**
		2		0,30	0,29	0,13	0,18	-0,37	-0,47*	-0,52**	-0,44*	-0,12	0,10	0,49*	0,51	0,54**	0,26	-0,36
	Out	1			-0,07	-0,52**	-0,49	0,30	0,28	0,19	0,07	0,00	-0,11	-0,28	-0,46*	-0,47*	-0,32	0,00
		2				-0,51**	-0,38	0,56**	0,20	0,34	0,12	0,08	-0,07	-0,30	-0,51*	-0,55**	-0,48*	-0,05
	Nov	1					0,08	-0,13	-0,15	0,33	0,35	0,44*	0,45*	0,41	0,39	0,19	-0,14	-0,26
		2						-0,18	0,15	0,23	-0,05	-0,08	-0,19	-0,38	-0,28	-0,61**	-0,62**	-0,24
	Dez	1							-0,14	-0,05	-0,20	-0,18	-0,16	-0,17	-0,04	-0,24	-0,34	-0,23
		2								-0,05	-0,21	-0,40	-0,52**	-0,69***	-0,49	-0,48*	-0,21	0,10
	Jan	1									0,55**	0,64**	0,58**	0,26	-0,22	-0,24	-0,41	-0,65**
		2										0,63**	0,56**	0,17	-0,40	-0,37	-0,30	-0,28
	Fev	1											-0,23	0,09	0,42	0,29	0,08	-0,22
		2												-0,36	-0,49*	-0,32	0,00	0,02
	Mar	1													0,19	-0,15	-0,37	-0,30
		2														-0,04	-0,12	-0,27
	Abr	1															-0,29	-0,29
		2																-0,47*

APÊNDICE 13. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Campanha. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

Campanha		NDVI																
		Set		Out		Nov		Dez		Jan		Fev		Mar		Abr		
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Radiação Solar	Set	1	0,03	-0,63**	0,04	0,07	0,55**	0,60**	0,68***	0,19	0,01	0,42	-0,09	-0,45*	-0,10	0,13	0,24	0,72***
		2		0,26	-0,26	-0,36	-0,48*	-0,08	0,33	0,25	0,00	-0,18	-0,32	-0,43*	-0,67**	-0,36	-0,11	0,15
	Out	1			-0,66**	-0,62**	0,01	0,17	0,62**	0,19	0,33	0,28	0,07	-0,64**	-0,62**	-0,54**	-0,19	0,44*
		2				-0,43*	-0,09	-0,02	0,67**	0,37	0,48*	0,18	-0,06	-0,78***	-0,54**	-0,48*	-0,29	0,46*
	Nov	1					-0,06	0,16	0,19	0,31	-0,20	0,29	0,08	-0,16	-0,27	-0,10	-0,35	-0,14
		2						-0,23	-0,23	0,03	0,28	0,43*	0,59**	0,26	-0,06	-0,35	-0,56	-0,67**
	Dez	1							0,21	0,39	0,46*	0,71***	0,58**	-0,16	-0,22	-0,53**	-0,43	-0,28
		2								-0,15	0,18	0,09	0,43*	0,01	-0,37	-0,45*	-0,57	-0,36
	Jan	1									-0,18	-0,07	-0,17	0,07	-0,30	-0,30	-0,44	-0,53**
		2										0,40	-0,32	-0,43*	-0,28	0,09	-0,19	0,33
	Fev	1											-0,03	-0,28	-0,16	-0,39	-0,31	-0,15
		2												-0,07	-0,15	0,13	0,00	0,22
	Mar	1													-0,57**	-0,55**	-0,36	-0,03
		2														-0,71***	-0,19	0,31
	Abr	1															-0,20	0,10
		2																0,16

APÊNDICE 14. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Depressão Central. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

Depressão Central		NDVI																
		Set		Out		Nov		Dez		Jan		Fev		Mar		Abr		
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Radiação Solar	Set	1	-0,16	-0,19	0,06	-0,20	0,13	0,00	0,32	0,56**	0,45*	0,55**	0,27	-0,04	-0,15	0,07	-0,21	0,18
		2		-0,06	-0,18	0,01	0,04	-0,20	-0,42	-0,46*	-0,46*	-0,12	-0,08	0,34	0,42	0,60**	0,40	-0,36
	Out	1			-0,32	-0,47*	-0,81***	-0,69***	0,35	0,33	0,51*	0,27	0,41	-0,53**	-0,51*	-0,45*	-0,43*	-0,17
		2				-0,48*	-0,54**	-0,31	0,22	0,30	0,28	0,08	0,16	-0,65**	-0,60**	-0,51*	-0,43*	0,20
	Nov	1					0,30	0,06	0,30	0,27	0,18	0,20	0,19	0,40	0,38	0,46*	0,10	0,08
		2						-0,56**	-0,37	0,15	0,28	0,56**	0,65**	-0,01	-0,08	-0,33	-0,49*	-0,76***
	Dez	1							-0,33	0,43*	0,61**	0,90***	0,78***	0,31	0,05	-0,21	-0,59**	-0,69***
		2								-0,29	-0,03	0,01	0,36	-0,23	-0,23	-0,38	-0,42	-0,53**
	Jan	1									0,17	0,48*	-0,03	-0,14	-0,12	0,21	-0,04	-0,46*
		2										0,31	-0,09	-0,33	-0,55**	-0,17	-0,48*	-0,35
	Fev	1											0,12	-0,15	-0,06	-0,19	-0,17	-0,27
		2												-0,23	-0,20	-0,08	-0,12	-0,09
	Mar	1													0,19	0,16	-0,15	-0,48*
		2														-0,17	-0,10	-0,19
	Abr	1															-0,28	-0,22
		2																-0,27

APÊNDICE 15. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Planície Interna. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

Planície Interna		NDVI																
		Set		Out		Nov		Dez		Jan		Fev		Mar		Abr		
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Radiação Solar	Set	1	-0,42	-0,35	-0,40	-0,44*	-0,02	0,58**	0,50*	0,79***	0,41	0,24	0,37	-0,62**	-0,29	-0,31	-0,21	0,01
		2		0,18	0,05	-0,15	-0,07	-0,04	0,04	0,19	-0,18	-0,09	-0,14	0,04	-0,17	0,08	-0,19	0,01
	Out	1			-0,49**	-0,74	-0,72***	-0,15	0,17	0,27	0,56**	0,47*	0,18	-0,54**	-0,68***	-0,72***	-0,55**	-0,25
		2				-0,55**	-0,41	-0,13	0,64**	0,28	0,61**	0,68***	0,53	-0,68***	-0,55**	-0,64**	-0,35	0,11
	Nov	1					0,57	-0,08	0,21	0,56	0,06	0,00	0,27	-0,06	0,36	0,41	-0,19	-0,01
		2						0,10	-0,41	0,31	0,26	0,28	0,26	0,01	-0,06	-0,16	-0,62**	-0,75***
	Dez	1							0,26	0,70***	0,59**	0,30	0,44*	-0,07	0,22	0,19	-0,37	-0,09
		2								0,40	0,34	0,43	0,30	-0,23	-0,31	-0,28	-0,74***	-0,45*
	Jan	1									0,35	0,01	0,17	-0,17	0,43*	0,44	-0,22	0,19
		2										0,07	-0,21	-0,24	-0,40	-0,41	-0,49*	-0,23
	Fev	1											0,29	-0,39	-0,16	-0,11	-0,52**	-0,05
		2												-0,14	-0,30	-0,51*	0,09	-0,14
	Mar	1													0,01	-0,02	-0,28	-0,35
		2														0,23	-0,36	-0,44*
	Abr	1															-0,09	0,16
		2																-0,37

APÊNDICE 16. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Planície Externa. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

Planície Externa		NDVI																	
		Set		Out		Nov		Dez		Jan		Fev		Mar		Abr			
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Radiação Solar	Set	1	-0,43*	-0,15	-0,27	-0,23	-0,17	-0,08	0,14	0,45*	0,14	0,02	-0,41	-0,54**	-0,21	-0,24	-0,24	-0,23	
		2		0,27	0,34	0,22	0,29	-0,20	-0,03	-0,09	-0,30	-0,08	0,08	0,31	0,41	0,35	0,16	-0,01	
	Out	1			-0,07	-0,09	-0,39	-0,42	-0,48	-0,29	0,18	0,17	-0,06	-0,11	-0,01	-0,14	-0,03	-0,19	
		2				-0,02	0,10	-0,32	-0,33	-0,12	-0,20	0,43*	0,57	0,46*	-0,10	-0,23	-0,25	-0,04	
	Nov	1					0,74***	0,29	0,36	0,13	-0,42	-0,10	0,09	0,46*	0,50	0,29	0,20	0,29	
		2						-0,22	-0,38	0,24	0,06	0,42	0,35	0,50*	0,15	-0,19	-0,38	-0,17	
	Dez	1							-0,24	0,38	0,41	0,63**	0,72***	0,02	-0,32	-0,36	-0,56**	-0,14	
		2								0,28	0,56**	0,64**	0,59**	0,06	-0,22	-0,43*	-0,46*	-0,32	
	Jan	1									-0,02	0,16	0,10	0,26	0,31	0,05	-0,23	0,02	
		2										-0,43	-0,51**	0,26	0,62**	0,51*	0,48*	0,05	
	Fev	1											-0,40	-0,49*	-0,37	-0,44*	-0,21	-0,33	
		2												0,13	0,04	0,20	0,36	0,38	
	Mar	1													0,51	0,29	-0,09	-0,17	
		2														0,15	0,01	0,13	
	Abr	1																-0,02	-0,34
		2																	

APÊNDICE 17. Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre o NDVI e a radiação solar global na região Zona Sul. Período: safras agrícolas de 2000/01 até 2009/10. ***Significativo a 1%; ** Significativo a 5%; * Significativo a 10%.

Zona Sul		NDVI																
		Set		Out		Nov		Dez		Jan		Fev		Mar		Abr		
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Radiação Solar	Set	1	0,06	-0,21	0,33	0,32	0,62	0,53**	0,38	0,26	0,05	0,22	-0,16	-0,28	0,20	0,22	0,53**	0,63**
		2		0,18	-0,12	-0,24	-0,47*	-0,06	0,38	0,18	-0,15	-0,11	-0,21	-0,23	-0,55**	-0,13	-0,06	0,12
	Out	1			-0,57	-0,67**	0,05	0,21	0,43*	0,14	0,34	0,45*	0,30	-0,49*	-0,63**	-0,61**	-0,32	0,23
		2				-0,52**	-0,08	0,14	0,50*	0,42	0,42	0,45*	-0,09	-0,77***	-0,75***	-0,62**	-0,63**	0,13
	Nov	1					-0,16	-0,19	0,30	0,09	-0,13	0,05	0,12	0,15	0,14	0,29	-0,06	-0,07
		2						-0,23	0,11	0,04	0,22	0,28	0,35	0,28	0,35	0,20	-0,14	-0,25
	Dez	1							0,11	0,04	0,22	0,28	0,35	0,28	0,35	0,20	-0,14	-0,25
		2								0,04	0,22	0,28	0,35	0,28	0,35	0,20	-0,14	-0,25
	Jan	1									0,05	-0,43*	-0,68***	-0,28	0,23	0,09	0,40	0,23
		2										-0,75***	-0,67**	0,20	0,05	0,29	-0,05	-0,25
	Fev	1											0,26	-0,25	-0,27	-0,20	-0,24	0,00
		2												-0,50*	-0,36	-0,18	-0,15	0,30
	Mar	1													-0,46*	-0,38	-0,84***	-0,50*
		2														-0,39	-0,69***	-0,66**
	Abr	1															-0,11	-0,38
		2																-0,40