

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

**MODELO AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL
DE ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DA SOJA
PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Ricardo Wanke de Melo
Engenheiro Agrônomo – UFRGS

Dissertação apresentada como um dos
requisitos à obtenção do Grau de
Mestre em Fitotecnia
Área de concentração Agrometeorologia

Porto Alegre, RS, Brasil
Janeiro de 2003

AGRADECIMENTOS

À amiga, companheira e esposa Cimara Regina Grohs, pelo apoio, compreensão e motivação diária.

À amiga, colega e orientadora Denise Cybis Fontana, pela confiança, motivação e, principalmente, pelo exemplo profissional, que foram indispensáveis para o andamento dos trabalhos.

À Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, por disponibilizarem suas instalações e recursos materiais para a realização desta dissertação.

Aos meus familiares: Clarice Roseli Galle de Melo, Erika Collischon, Gustavo Galle de Melo, Liselotte Wanke de Melo, Nedi Maicá de Melo, Renato Wanke de Melo e Roberto Wanke de Melo, pelo apoio constante.

Aos amigos e colegas Aníbal Gusso, Bernadete Radin, Bruna Maria Machado Heckler, Carlos Reisser Júnior, Caroline Rieth, Cleusa Adriane Menegassi Bianchi, Equipe de Agrometeorologia da FEPAGRO, Fabíola Lopes, Francisco Mandelli, Genei Antonio Dalmago, Gilberto Barbosa Diniz, Heinrich Hasenack, Homero Bergamaschi, Janice Freitas Leivas, João Ito Begonci, Júlio Renato Quevedo Marques, Kleiton Douglas Saggin, Luciano de Campos Carmona, Luís Mauro Gonçalves Rosa, Moacir Antonio Berlato, Régis Lisbôa Baptista, Rosângela (8ºDISME/INMET), Solange França, Tatiana Silva de Almeida e Tatiane Paiva Pereira por sua colaboração direta em etapas deste trabalho.

MODELO AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL DE ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DA SOJA PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL¹

Autor: Eng. Agr. Ricardo Wanke de Melo
Orientadora: Eng^a Agr^a Dr^a Denise Cybis Fontana
Co-orientador: Eng. Agr. Dr. Moacir Antonio Berlato

RESUMO

O Estado do Rio Grande do Sul é grande produtor e exportador de grãos, sendo responsável por, aproximadamente, 20% da produção nacional de soja. No entanto, os rendimentos desta cultura apresentam alta variabilidade interanual, conseqüência da também alta variabilidade interanual da precipitação pluvial. O objetivo deste trabalho foi ajustar e validar um modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja para o Rio Grande do Sul, para ser utilizado em programas de previsão de safras. O modelo proposto é composto por um termo agrometeorológico, obtido pelo ajuste do modelo multiplicativo de Jensen (1968), modificado por Berlato (1987) ao qual foi introduzido um fator de correção, e um termo espectral, obtido pela média do NDVI máximo dos meses de dezembro e janeiro. Os dados de rendimento médio da soja (estatísticas oficiais do IBGE) e os dados de estações meteorológicas (obtenção da evapotranspiração relativa - ETr/ETo) foram referentes ao período de 1975 a 2000, enquanto que as imagens de NDVI/NOAA foram do período de 1982 a 2000. A aplicação do modelo de Jensen modificado permite a obtenção das estimativas do rendimento da cultura da soja, no Estado do Rio Grande do Sul, com precisão, rapidez, praticidade, objetividade e baixo custo, cerca de um mês antes do final da colheita, conferindo ao mesmo um caráter preditivo. A aplicação do modelo agrometeorológico-espectral, entretanto, promove melhoria na acurácia das estimativas dos rendimentos, permitindo a geração de mapas de rendimento de soja para a região de produção significativa desta cultura no Estado, considerando, além da evapotranspiração relativa, outros fatores que influenciam na determinação dos rendimentos. A utilização de imagens de satélite, recursos de informática e de geoprocessamento permite rapidez na análise de dados para a avaliação do desenvolvimento das culturas agrícolas.

AGROMETEOROLOGICAL-SPECTRAL MODEL TO ESTIMATE THE

¹ Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (88p.). Janeiro, 2003.

SOYBEAN YIELD IN THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL¹

Author: Eng. Agr. Ricardo Wanke de Melo
Advisor: Eng^a Agr^a Dr^a Denise Cybis Fontana
Co-advisor: Eng. Agr. Dr. Moacir Antonio Berlato

ABSTRACT

The State of Rio Grande do Sul is one of the greatest producers and exporters of grains in Brazil, being responsible for approximately 20% of the national production of soybean. The grain yields of this crop, however, present a high interannual variability, as a consequence of the high interannual variability of the pluvial precipitation. The objective of this study was to adjust and validate an agrometeorological-spectral model to estimate soybean yield in the State of Rio Grande do Sul, Brazil, for use in yield forecasting programs. The proposed model is composed by an agrometeorological term, obtained by adjusting the multiplicative model of Jensen (1968), modified by Berlato (1987), and a spectral term, obtained from the maximum NDVI, averaged from December to January. The soybean yield averaged data (taken from official statistics) and the weather data (used to calculate the relative evapotranspiration - ET_r/ET_o) were obtained from 1975 to 2000, while the NDVI/NOAA images were obtained from 1982 to 2000. The application of the Jensen model allows the easy estimation of soybean yield, with precision, objectivity and low cost, at about one month before the end of the harvest, giving to the model a predictive character. However, the application of the agrometeorological-spectral model allows better yield estimates, allowing also the generation of soybeans yield maps for the most significant soybean production region of the State of Rio Grande do Sul. Besides the relative evapotranspiration the model uses other factors influencing the yield determination. The use of satellite images, and of computer resources and geoprocessing allows fast data analysis for monitoring the development of agricultural crops.

SUMÁRIO

Página

¹Master of Science dissertation in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (88p.) January, 2003.

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 A cultura da soja.....	4
2.1.1 Histórico.....	4
2.1.2 Classificação botânica.....	6
2.1.3 Características morfológicas da planta.....	6
2.1.4 Estádios de desenvolvimento.....	7
2.1.5 Exigências bioclimáticas.....	9
2.1.5.1 Disponibilidade hídrica.....	9
2.1.5.2 Temperatura.....	11
2.1.6 O ciclo da cultura no Rio Grande do Sul	12
2.1.7 Zoneamento agroclimático da soja no Rio Grande do Sul.....	12
2.2 Modelos agrometeorológicos de estimativa de rendimento.....	15
2.3 Modelos espectrais.....	16
2.4 Modelos agrometeorológico-espectrais.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1 Região de estudo.....	22
3.1.1 Solos.....	24
3.1.2 Clima.....	25
3.2 Dados.....	25
3.2.1 Dados meteorológicos.....	25
3.2.2 Imagens NOAA.....	27
3.2.3 Estatísticas oficiais.....	28
3.3 Análises.....	28
3.3.1 Agrupamento dos municípios segundo o rendimento, produção e área colhida de soja.....	28
3.3.2 Mapeamento do rendimento.....	29
3.3.3 Ajuste do modelo.....	30
3.3.3.1 Obtenção do termo agrometeorológico.....	31
a) Cálculo do rendimento relativo.....	31
b) Cálculo da evapotranspiração relativa.....	32
c) Determinação dos expoentes do modelo de Jensen modificado.....	32
d) Espacialização do modelo de Jensen modificado	33
e) Cálculo do fator de correção.....	34
3.3.3.2 Obtenção do termo espectral.....	35
3.3.4 Verificação da acurácia das estimativas.....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1 Estatísticas oficiais.....	36
4.1.1 Análises de agrupamento.....	36
4.1.1.1 Grupos baseados no rendimento médio de soja.....	36
4.1.1.2 Grupos baseados na produção de soja.....	41
4.1.1.3 Grupos baseados na razão entre a área colhida de soja e a área total do município.....	44
4.1.1.4 Considerações sobre os grupos.....	47
a) Quanto ao rendimento.....	48
b) Quanto ao índice de vegetação.....	49
4.1.2 Imagens digitais de rendimentos.....	51

4.2	Estimativa de rendimento.....	53
4.2.1	Termo agrometeorológico.....	53
4.2.1.1	Rendimento relativo.....	53
4.2.1.2	Evapotranspiração relativa.....	54
4.2.1.3	Modelo de Jensen modificado.....	57
4.2.1.4	Fator de correção.....	62
4.2.1.5	Estimativas obtidas pelo termo agrometeorológico....	62
4.2.2	Termo espectral.....	65
4.2.3	Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja para o Estado do Rio grande do Sul.....	70
4.2.4	Acurácia das estimativas.....	73
4.3	Considerações finais e sugestões.....	79
5.	CONCLUSÕES.....	81
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Consumo de água médio diário da soja, cultivar Bragg, no período 1974/1977, em Taquari, RS.....	10

2. Ciclos característicos das cultivares de soja indicadas para o Rio Grande do Sul.....	12
3. Critérios para zoneamento agroclimático da cultura da soja no Rio Grande do Sul.....	13
4. Municípios integrantes da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul.....	23
5. Coordenadas geográficas das estações meteorológicas localizadas na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul e órgão responsável pela coleta de dados.....	26
6. Valores médio, máximo e mínimo do rendimento médio da soja na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período 1997-2000, município que os apresentou e ano de ocorrência....	40
7. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “A” (maior rendimento de soja).....	40
8. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “B” (médio rendimento de soja).....	41
9. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “C” (menor rendimento de soja).....	41
10. Valores médio, máximo e mínimo da produção da soja na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período 1997-2000, município que os apresentou e ano de ocorrência.....	43
11. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “D” (maior produção de soja).....	43
12. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “E” (média produção de soja).....	43
13. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “F” (menor produção de soja).....	44
14. Valores médio, máximo e mínimo de razão entre a área colhida de soja e a área total do município , na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período 1997-2000, município que os apresentou e ano de ocorrência.....	46
15. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “G” (maior razão entre área colhida de soja e a área do município).....	46

16. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “H” (média razão entre área colhida de soja e a área total do município).....	46
17. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “I” (menor razão entre a área colhida de soja e a área total do município).....	47
18. Valores do rendimento relativo da soja no Estado do Rio Grande do Sul. Período: 1975 a 2000.....	53
19. Valores de evapotranspiração relativa (ETr/ETo) para a soja no mês de janeiro , na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul.....	55
20. Valores de evapotranspiração relativa (ETr/ETo) para a soja no mês de fevereiro , na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul.....	55
21. Valores de evapotranspiração relativa (ETr/ETo) para a soja no mês de março , na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul.....	55
22. Estatísticas dos expoentes estimados para o modelo de Jensen modificado para a estimativa do rendimento de soja no Rio Grande do Sul. Período: 1975 a 2000.....	58
23. Valores do termo agrometeorológico (kg/ha) do modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja no Rio Grande do Sul.....	63
24. Valores do termo espectral (NDVI médio de dezembro e janeiro) do modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja no Rio Grande do Sul.....	70
25. Estatísticas dos parâmetros do modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da cultura da soja no Rio Grande do Sul Período: 1982 a 2000.....	71
26. Rendimentos médios da cultura da soja, na região de produção significativa desta cultura no Estado do Rio Grande do Sul, estimados pelo Modelo Agrometeorológico-Espectral.....	73

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Zoneamento agroclimático para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul.....	14
2. Municípios do Estado do Rio Grande do Sul. Em vermelho está representada a região de produção significativa de soja.....	23
3. Municípios da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul agrupados, pelo método de Ward, considerando o rendimento médio . Período: 1997-2000.....	37

4. Municípios da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul agrupados, pelo método de Ward, considerando o rendimento médio, comparados ao zoneamento agroclimático para a cultura no Estado.....	38
5. Municípios da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul agrupados, pelo método de Ward, considerando a produção de grãos . Período: 1997-2000.....	42
6. Municípios da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul agrupados, pelo método de Ward, considerando a razão entre a área colhida de soja e a área total do município . Período: 1997-2000..	45
7. Rendimentos médios da soja, na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, nos grupos de alto (A), médio (B) e baixo (C) níveis de rendimento. Período 1982 a 2000.....	49
8. Variação do máximo NDVI médio dos grupos de alto (A), médio (B) e baixo (C) rendimento, na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul. Período: 1982 a 2000.....	50
9. Rendimentos observados (kg/ha) na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul, no período de 1981 a 2000. Os <i>pixels</i> em preto representam ausência de dados.....	52
10. Coeficientes de correlação entre os valores de evapotranspiração relativa (ETr/ETo) e os rendimentos médios da soja na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul. Período: 1975 a 2000.....	54
11. Rendimentos relativos (Y/Ym) do Estado e evapotranspiração relativa (ETr/ETo) média de janeiro, fevereiro e março, na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul. Período: 1975 a 2000.....	57
12. Rendimentos de soja estimados pelo modelo de Jensen modificado em função dos rendimentos observados, considerando os anos de ajuste . Período básico: 1975-2000.....	59
13. Rendimentos de soja estimados pelo modelo de Jensen modificado em função dos rendimentos observados, considerando os anos de validação . (1982,1985,1990,1991 e 1997).....	60
14. Rendimentos de soja (kg/ha) estimados pelo modelo de Jensen modificado na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período de 1982 a 2000 (*anos do período de validação).....	61

15. Valores do fator de correção do modelo de Jensen modificado para a região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul.....	63
16. Rendimentos de soja (kg/ha) estimados pelo termo agrometeorológico na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período de 1982 a 2000 (*anos do período de validação).....	64
17. Evolução temporal do NDVI (valores mínimo, médio e máximo) na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul. Período: 1982 a 2000.....	66
18. Calendário agrícola médio da cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. Período 1986 a 2000.....	66
19. Coeficientes de correlação entre os valores de índice de vegetação (NDVI) e os rendimentos médios da soja na região de produção significativa desta cultura no Rio grande do Sul. Período: 1982 a 2000....	67
20. Imagens do termo espectral (NDVI médio de dezembro e janeiro) do modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja no Rio Grande do Sul. Período: 1982 a 2000 (*anos do período de validação).....	69
21. Rendimentos de soja (kg/ha) estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período de 1982 a 2000 (*anos do período de validação).....	72
22. Rendimentos de soja estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral em função dos rendimentos observados, considerando os anos de ajuste . Período básico: 1982-2000.....	74
23. Rendimentos de soja estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral em função dos rendimentos observados, considerando os anos de validação . Período básico: 1982-2000.....	74
24. Desvios dos rendimentos de soja estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral em relação aos rendimentos observados no período de 1982 a 2000. Os <i>pixels</i> pretos indicam ausência de dados. (*anos do período de validação).....	76
25. Frequência de ocorrência dos desvios absolutos de estimativa do rendimento da soja pelo modelo agrometeorológico-espectral no período de ajuste . Período básico: 1982-2000.....	77
26. Frequência de ocorrência dos desvios absolutos de estimativa do rendimento da soja pelo modelo agrometeorológico-espectral no período de validação . Período básico: 1982-2000.....	77

27. Estimativas do rendimento da cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul, obtidas pelo Termo Agrometeorológico (TA) e pelo Modelo agrometeorológico-espectral (AE), comparadas ao rendimento observado (Obs) ao longo da série estudada.....	78
---	----

1. INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul é um dos maiores produtores e exportadores de grãos do Brasil. O Estado é responsável por aproximadamente 20% da produção nacional de soja, tendo no ano agrícola 2000/2001 produzido 6.935 mil toneladas, com um rendimento médio de 2.339kg/ha (IBGE, 2001). O valor total da produção desta cultura no Estado, em um ano agrícola, é de, aproximadamente, 2,3 bilhões de reais (EMATER, 2002).

Atualmente, a soja é a cultura que apresenta a maior área de cultivo no Rio Grande do Sul, oscilando em torno de 3 milhões de hectares por ano. A cultura participa da economia de pequenos, médios e grandes estabelecimentos rurais, estando presente em 33,14% destes (142.487 unidades produtivas). Em relação aos estabelecimentos rurais que cultivam soja, 93,94% possuem áreas com menos de 50ha, segundo o Censo Agropecuário do Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2001). Em média, sua produção tem sido crescente nos últimos anos devido à aplicação de tecnologia à cultura, pelo emprego de materiais genéticos de bom potencial produtivo e pela crescente profissionalização dos produtores rurais. No entanto, na maior parte dos anos, a frequência e a intensidade das chuvas no período do desenvolvimento da soja (outubro a março) são insuficientes para que a cultura manifeste seu potencial produtivo

(Matzenauer et al., 2002). Esta é a principal causa da variabilidade interanual dos rendimentos da soja no Rio Grande do Sul.

Dada a grande importância econômica e social desta cultura, a previsão da safra da soja no Estado é fundamental à tomada de decisões para o planejamento, definição de prioridades, estabelecimento da política de preços e para o manejo dos estoques reguladores do Governo Federal e do parque instalado para o armazenamento da produção.

Atualmente, as estimativas do rendimento, assim como da área cultivada e produção, são obtidas através da aplicação de questionários à parte dos agricultores ou a entidades relacionadas à atividade agrícola. Reuniões mensais são realizadas para avaliação dos dados coletados. As estimativas são obtidas através da reunião de dados de diversas regiões, o que é uma metodologia lenta, onerosa e com certo grau de subjetividade. O desenvolvimento de métodos que permitam uma obtenção precisa, rápida e objetiva das estimativas do rendimento da cultura da soja é, portanto, de grande importância.

Uma possibilidade é o desenvolvimento de modelos de estimativa do rendimento que, de alguma forma, expressem a influência de fatores ambientais no rendimento final das culturas agrícolas. A viabilidade de utilização destes modelos agrometeorológicos já foi demonstrada, em nível de pesquisa, para diversas culturas. No Rio grande do Sul, a disponibilidade hídrica é o principal elemento utilizado na modelagem do rendimento da soja, dado que este fator influencia o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento final de grãos desta cultura.

Grande parte dos modelos agrometeorológicos propostos, no entanto, não contemplam outros fatores que influenciam a definição dos rendimentos, como por exemplo, ocorrência de pragas e doenças, manejo diferenciado da cultura, fertilidade dos solos, entre outros. Estes fatores podem, em parte, ser avaliados indiretamente através do monitoramento do desenvolvimento da cultura através de imagens de satélite. As imagens proporcionam uma visão geral da cultura, cujo crescimento é consequência da integração de todos os fatores que determinam o seu desenvolvimento.

Em vista do exposto, acredita-se que o uso de modelos agrometeorológicos, em conjunto com imagens de satélite, pode incorporar maior precisão, rapidez, objetividade e economia na estimativa do rendimento da soja.

O objetivo desta dissertação foi ajustar e validar um modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da cultura da soja para o Estado do Rio Grande do Sul, que seja preciso, objetivo, prático e econômico, e que possa ser incorporado em programas de previsão de safras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da soja

2.1.1 Histórico

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma leguminosa domesticada pelos chineses há cerca de cinco mil anos. Sua espécie mais antiga, a soja selvagem, crescia principalmente nas terras baixas e úmidas, junto aos juncos, nas proximidades dos lagos e rios da China Central. Há três mil anos a soja se espalhou pela Ásia, onde começou a ser utilizada como alimento. Foi no início do século XX que passou a ser cultivada comercialmente nos Estados Unidos. A partir de então, houve um rápido crescimento na produção, com o desenvolvimento das primeiras cultivares comerciais.

No Brasil, a partir do final do século XIX, e durante muitas décadas, a soja foi cultivada em caráter experimental. Em 1891 foi semeada na Estação Agrônômica de Campinas, São Paulo, e no mesmo ano em Dom Pedrito, Rio Grande do Sul. Após estas primeiras experiências, foram realizadas diversas outras, com destaque para as semeaduras realizadas em 1914 pela Escola Superior de Agronomia e Veterinária, da Universidade Técnica do Rio Grande do Sul, e em 1921, na Estação Experimental de Agricultura e Criação em Santa Rosa. A utilização da soja na alimentação de suínos, como fonte de proteína, e

como adubação verde, na rotação de culturas com o trigo, foi decisiva na consolidação da cultura no Estado do Rio Grande do Sul (Caruso, 1997).

A grande expansão da soja no Brasil aconteceu somente a partir dos anos 70, com o interesse crescente da indústria de óleo e a demanda do mercado internacional. O interesse do governo brasileiro pela expansão na produção da soja para atender a indústria fez com que a leguminosa ganhasse cada vez mais incentivos oficiais. Diversas estradas, ferrovias e hidrovias foram instaladas e portos foram modernizados para o escoamento da produção.

Os produtos e subprodutos do grão de soja são utilizados, atualmente, pela agroindústria de alimentos e indústria química. A soja integral é utilizada pela indústria de alimentos em geral e o óleo cru é transformado em óleo refinado e lecitina, que dá origem a inúmeros outros produtos. A proteína de soja dá origem a produtos comestíveis (ingredientes de padaria, massas, produtos de carne, cereais, misturas preparadas, bebidas, alimentação para bebês, confeções e alimentos dietéticos). É utilizada também pelas indústrias de adesivos e nutrientes, alimentação animal, adubos, formuladores de espumas, fabricantes de fibra, revestimentos, papel e emulsão de água para tintas (EMBRAPA/CNPSO, 2001).

Embora o Brasil seja o segundo maior produtor de soja do mundo, o grão vem sendo utilizado em larga escala apenas pela indústria de alimentos, onde o produto é ingrediente na fabricação de embutidos, chocolates e bolachas. Do total de grãos produzidos, cerca de 72% são transformados em farelo, principal componente protéico de rações para suínos e aves (EMBRAPA/CNPSO, 2001).

2.1.2 Classificação botânica

A soja é uma planta que pertence à família das leguminosas (*Fabaceae*), à subfamília *Faboidea* e à tribo *Phaseolae*. Além da espécie cultivada, *Glycine max* (L.) Merrill, o gênero *Glycine* possui, aproximadamente, quinze outras espécies originárias de regiões tropicais, dentre as quais cinco apresentam, de certa forma, valor econômico e genético (Alvarez Filho, 1988).

2.1.3 Características morfológicas da planta

A soja é um vegetal herbáceo e anual, com altura média variando entre 0,50m e 1,50m. Possui raiz do tipo pivotante, de onde partem raízes secundárias que se ramificam formando um sistema radicular adaxial, fasciculado. Podem apresentar pequenos nódulos ligados ao sistema vascular resultantes da infestação por bactérias do gênero *Bradyrhizobium japonicum* (Alvarez Filho, 1988).

A planta possui três tipos de folhas: as cotiledonares, em número de duas, que são as primeiras a surgirem após a germinação; as simples (opostas), também em número de duas, que surgem após as cotiledonares; e as compostas trifolioladas, alternadas, de pecíolos grandes, folíolos ovais ou ovais-lanceolados, de 7 a 15cm de comprimento e caducas por ocasião do amadurecimento dos frutos (Alvarez Filho, 1988).

A flor é completa e hermafrodita. As inflorescências nascem nas axilas das folhas ou no ápice das ramificações do caule. O fruto é do tipo vagem, hirsuto, de coloração amarelada a preta. As vagens são normalmente pendentes

e em número de uma a cinco por pedúnculo. As vagens de uma mesma planta apresentam maturação simultânea, acompanhada da desfolhação (Alvarez Filho, 1988).

A coloração, o tamanho e a forma das sementes são variáveis conforme a cultivar. As sementes podem ser amarelas, castanhas, verdes, pretas ou bicolores. O número de sementes por vagem varia de uma a cinco, sendo, geralmente, duas ou três (Alvarez Filho, 1988).

2.1.4 Estádios de desenvolvimento

A caracterização dos estádios de desenvolvimento da cultura da soja foi realizada com a finalidade de padronizar critérios ou parâmetros para a avaliação de resultados em diferentes experimentos ou pesquisas. Para a identificação destes estádios é necessário reconhecer e identificar os nós do caule, estruturas salientes, separadas e dispostas ao longo deste, que darão origem às folhas e às inflorescências (Alvarez Filho, 1988).

A identificação do estágio de desenvolvimento em que a planta se encontra é feita através da contagem dos nós do caule principal, começando pelo que sustenta as duas primeiras folhas simples e opostas situado logo acima do nó cotiledonar. Todos os nós que apresentaram ou apresentem folhas desenvolvidas são contados para a identificação do estágio de desenvolvimento. A folha é considerada desenvolvida quando os bordos dos folíolos da folha do nó imediatamente superior a esta não estejam mais se tocando (Alvarez Filho, 1988).

A germinação da semente inicia imediatamente após o contato com a umidade do solo. A emergência das plântulas ocorre entre o quinto e o décimo

quinto dia após o início da germinação. O tempo transcorrido entre a sementeira e a emergência depende da temperatura e umidade do solo, sistema e profundidade da sementeira (Alvarez Filho, 1988).

Segundo Fehr & Cavines (1977), a soja apresenta dois principais períodos de desenvolvimento: vegetativo e reprodutivo. O período vegetativo inicia-se na emergência da plântula e termina com a abertura da primeira flor. O período reprodutivo inicia-se na abertura da primeira flor e termina com a maturação de colheita.

O período reprodutivo é crítico, sendo que a ocorrência de déficit hídrico pode comprometer o rendimento final de grãos. Dentro deste período a planta apresenta oito estádios, ou subperíodos, de desenvolvimento, que são identificados pela letra "R", seguida do número correspondente ao estágio. As características de cada estágio de desenvolvimento são: R1 (início da floração), quando uma flor se abre em qualquer nó do caule; R2 (plena floração), quando surgem flores no nó imediatamente abaixo do nó mais alto com folha desenvolvida; R3 (início da formação de vagens), quando uma vagem com 0,5cm aparece em um dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida; R4 (plena formação de vagens), quando uma vagem com 2,0cm de comprimento se desenvolve em um dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida; R5 (início do enchimento de grãos), quando grãos com 0,3cm se fixam em uma vagem dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida; R6 (pleno enchimento de grãos), quando surge pelo menos uma vagem contendo um grão verde em um dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida; R7 (maturação fisiológica), quando as vagens começam a atingir a maturação e a

tornarem-se amareladas; R8 (maturação de colheita), quando 95% das vagens apresentam coloração marrom (Fehr & Cavines, 1977).

2.1.5 Exigências bioclimáticas

A produtividade da soja depende do potencial genético da cultivar e das condições ambientais edáficas e climáticas. Dentre os elementos do clima, que podem influenciar o desenvolvimento da cultura, destacam-se a disponibilidade hídrica e a temperatura.

2.1.5.1 Disponibilidade hídrica

Cunha & Bergamaschi (1992) determinaram que o déficit hídrico, dentre os componentes limitantes ao desenvolvimento das culturas no Rio Grande do Sul, é aquele que afeta a produção agrícola com maior frequência e intensidade, sendo que a falta de água em momentos críticos do desenvolvimento das plantas pode influenciar direta e negativamente na produção de grãos.

Os períodos críticos da cultura da soja quanto à deficiência hídrica são os períodos de germinação, florescimento e início da formação de legumes (Doorembos & Kassam, 1979). No período vegetativo a ocorrência de estiagens prolongadas pode resultar em plantas de porte reduzido, com pequena área foliar. Já o enchimento de grãos é o subperíodo mais sensível à deficiência hídrica. A ocorrência de estiagem neste subperíodo provoca uma redução no rendimento substancialmente maior do que em qualquer outro subperíodo do ciclo da soja.

Por outro lado, o excesso hídrico também pode ser prejudicial. Em solos saturados ou próximos da saturação, a difusão de oxigênio é deficiente,

prejudicando o processo respiratório da semente na germinação. Do início da floração até o início da formação das vagens a soja é mais sensível a excessos de umidade no solo, podendo ocorrer queda abundante de flores e vagens jovens (Schneider et al., 1988).

Na Tabela 1 são apresentados os valores determinados por Berlato & Bergamaschi (1979) para o consumo médio de água nos diversos subperíodos e no ciclo da cultura da soja. Estes valores foram obtidos em Taquari, RS, sendo representativos para locais com condições climáticas semelhantes.

TABELA 1. Consumo de água médio diário da soja, cultivar Bragg, no período 1974/1977, em Taquari, RS. Fonte: Berlato & Bergamaschi (1979).

Subperíodos	Consumo de água médio	
	Diário (mm)	Total (mm)
Semeadura – emergência	2,2	16
Emergência – início da floração	5,1	266
Início da floração – surgimento de vagens	7,4	160
Surgimento de vagens – 50% de folhas amarelas	6,6	362
50% de folhas amarelas – maturação	3,7	36
Ciclo total	5,8	840

Posteriormente, Berlato et al. (1996) encontraram o maior consumo de água médio diário da soja (7,5mm/dia) do início da floração ao início do enchimento de grãos, coincidindo com a altura das plantas e índice de área foliar máximos da cultura.

Matzenauer et al. (2002) demonstraram que, em praticamente todos os anos, ocorre deficiência hídrica para a cultura da soja no Estado. Os autores determinaram também que as maiores deficiências hídricas ocorrem entre os subperíodos do início do florescimento e o início do enchimento de grãos. No Rio Grande do Sul, as semeaduras realizadas em dezembro foram as que apresentaram menor deficiência hídrica durante o período crítico, enquanto que

as semeaduras realizadas em outubro foram as que apresentaram as maiores deficiências hídricas durante o período crítico.

2.1.5.2 Temperatura

A temperatura do solo é importante na determinação do número de dias necessários para a emergência da soja. Berlato & Gonçalves (1978) concluíram que existe estreita relação entre a temperatura do solo à 5cm de profundidade e o número de dias transcorridos da semeadura à emergência. Com temperatura de 25°C a emergência ocorreu em 8 dias, com 17°C em 12 dias e com a temperatura média variando entre 19°C e 21°C, a emergência ocorreu em 10 a 11 dias.

A temperatura do ar influencia principalmente o desenvolvimento da cultura, sendo que temperaturas entre 15°C e 30°C são as mais favoráveis. Pascale (1969), em experimentos conduzidos na Argentina, relatou que a emergência da soja não ocorreu antes que a temperatura do ar atingisse 15°C. Berlato & Gonçalves (1978), utilizando a temperatura de 15°C como temperatura base da cultura da soja, determinaram que as exigências médias de soma térmica para a maturação variam de 1.158°C a 1.293°C, dependendo da cultivar. No entanto, Berlato et al. (1992) não encontraram correlação entre a temperatura e o rendimento final de grãos da soja.

2.1.6 O ciclo da cultura no Rio Grande do Sul

A escolha da época de semeadura da cultura da soja interfere no rendimento final de grãos. A época de semeadura é escolhida de maneira que o

período de maior sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (período reprodutivo) apresente menor risco de coincidir com épocas de deficiência hídrica. A época mais indicada para a semeadura varia conforme o ciclo da cultivar selecionada e as características do local da semeadura (solos e clima, principalmente).

No Estado do Rio Grande do Sul, a época recomendada para a semeadura é no período compreendido entre 11 de outubro e 31 de dezembro (Cunha et al. 2001). Cunha & Hass (1996) estimaram, com base nos trabalhos realizados por Bonato & Ignaczak (1992) e por Bonato et al. (1993 e 1994), os ciclos característicos das cultivares de soja indicadas para o Rio Grande do Sul, apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. Ciclos característicos das cultivares de soja indicadas para o Rio Grande do Sul. Fonte: Cunha & Hass (1996).

Semeadura	Grupo de maturação					
	Precoce		Médio		Semitardio/Tardio	
	EME-FLO ¹	EME-MAT ²	EME-FLO ¹	EME-MAT ²	EME-FLO ¹	EME-MAT ²
Outubro	64	156	63	162	72	170
Novembro	57	134	57	140	66	147
Dezembro	52	117	52	120	58	126

¹ Número médio de dias da emergência à floração.

² Número médio de dias da emergência à maturação.

Obs. A duração do subperíodo semeadura-emergência foi considerada fixa em 7 dias.

2.1.7 Zoneamento agroclimático da soja no Rio Grande do Sul

O zoneamento agroclimático tem por objetivo definir a aptidão das regiões (preferenciais, toleradas, marginais ou inaptas) ao desenvolvimento das culturas, para o que são cotejadas as exigências bioclimáticas de cada cultura com as disponibilidades climáticas regionais.

Para o Estado do Rio Grande do Sul, o zoneamento agroclimático da soja foi baseado no risco de ocorrência de deficiência hídrica e na soma térmica durante o período de crescimento da cultura.

Na Tabela 3 são apresentados os critérios utilizados para a definição das zonas preferencial, toleradas, marginais e inapta para o estabelecimento da cultura da soja no Rio Grande do Sul. A distribuição espacial destas zonas no Estado é observada na Figura 1.

TABELA 3. Critérios para zoneamento agroclimático da cultura da soja no Rio Grande do Sul. Fonte: Rio Grande do Sul (1994).

Zonas	Deficiência Hídrica		Soma Térmica (durante o crescimento)	
	mm	Restrições	Acima de 15°C	Restrições
Preferencial I	0	Sem restrições	> 1.200	Sem restrições
Toleradas				
II	0	Sem restrições	600 – 1.200	Estação de crescimento curta
III	1 – 100	Necessita irrigação eventual (deficiência pode atingir 100mm)	> 1.200	Sem restrições
IV	1 – 50	Necessita irrigação rara (deficiência é inferior a 50mm)	600 – 1.200	Estação de crescimento curta
Marginais				
V	> 100	Necessita Irrigação freqüente	> 1.200	Sem restrições
VI	> 100	Necessita Irrigação freqüente	600 – 1.200	Estação de crescimento curta
Inapta				
VII	0	Sem restrições	< 600	Insuficiência térmica

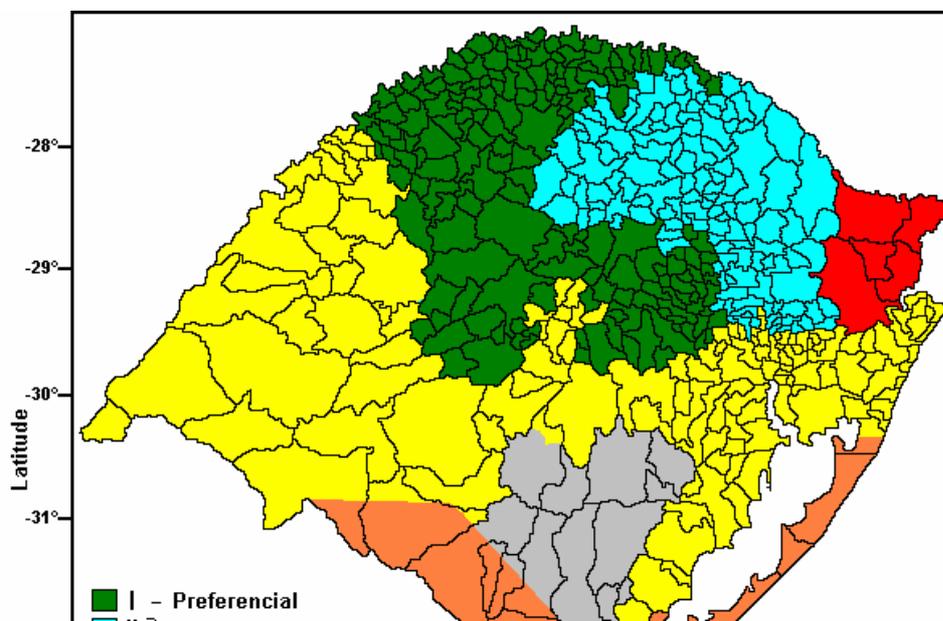


FIGURA 1. Zoneamento agroclimático para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul (Fonte: Rio Grande do Sul, 1994).

Mais recentemente, Cunha et al. (2001) utilizaram o índice de satisfação das necessidades de água (ISNA), correspondente à razão E_{Tr}/E_{Tm} , onde E_{Tm} corresponde à evapotranspiração máxima, para o subperíodo floração-enchimento de grãos. Este índice foi utilizado para definir classes de zoneamento para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul, sendo definidas três classes: $E_{Tr}/E_{Tm} \geq 0,65$ (favorável), $0,65 > E_{Tr}/E_{Tm} > 0,55$ (intermediária) e $E_{Tr}/E_{Tm} \leq 0,55$ (desfavorável). Para que uma determinada região se enquadre em uma destas classes, os valores respectivos devem aparecer em 80% dos anos.

2.2 Modelos agrometeorológicos de estimativa de rendimento

Os rendimentos da cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul apresentam alta variabilidade interanual, que, segundo Berlato & Fontana (1999), é conseqüência da também alta variabilidade interanual da precipitação pluvial. Esta variação nos rendimentos se deve ao fato de que quase a totalidade das lavouras de soja no Rio Grande do Sul é conduzida sem suplementação hídrica por irrigação.

Dado que já é amplamente conhecida a relação entre expressões da disponibilidade hídrica e o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento final de grãos, este fator deve ser utilizado na modelagem do rendimento da soja. Neste contexto, diversos autores têm proposto o uso de modelos agrometeorológicos para a estimativa dos rendimentos das culturas, tendo como variável independente alguma expressão da disponibilidade hídrica. Alguns exemplos de trabalhos realizados são os modelos agrometeorológicos de estimativa de rendimentos desenvolvidos por Massignam et al. (1998) para feijão no Estado de Santa Catarina, Delgado-Rojas & Barbieri (1999) para cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e o teste de aplicação do modelo de Doorenbos & Kassam (1979) realizado por Ferraudo et al. (1995) para a cultura do milho no Estado de São Paulo.

Alguns exemplos de trabalhos realizados no Rio Grande do Sul são os de Barni (1994) para girassol e Matzenauer et al. (1995) para o milho. Especificamente para a cultura da soja no Estado, Berlato (1987) ajustou e validou o modelo agrometeorológico de Jensen (1968), introduzindo uma modificação, na qual a ET_m (evapotranspiração máxima) é substituída por ET_o (evapotranspiração de referência). O autor utilizou dados de rendimento oriundos de parcelas experimentais, obtendo ótimos ajustes. No modelo proposto são atribuídos pesos diferentes aos estádios de desenvolvimento da cultura, de acordo com a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico. Tanto Berlato (1987), como Barni (1994) e Matzenauer et al. (1995), demonstraram que o subperíodo do florescimento ao enchimento de grãos é aquele de maior

sensibilidade das culturas ao déficit hídrico, e, portanto, aquele que assume maior peso na definição do rendimento final de grãos das culturas estudadas.

Posteriormente, Fontana et al. (2001b) ajustaram e validaram o modelo agrometeorológico de Jensen modificado para condições de lavoura, ou seja, utilizando dados oriundos de estatísticas oficiais do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Os resultados foram muito promissores, tendo os autores sugerido a incorporação do modelo agrometeorológico em programas operacionais de previsão de safra, dada a simplicidade, objetividade e baixo custo de implementação do modelo. Nas safras de 1998/1999 e 1999/2000 este modelo foi utilizado pela UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) em parceria com a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), tendo sido encontrados desvios, em relação aos dados oficiais, de 107kg/ha e 7kg/ha, respectivamente (Fontana et al., 1999 e 2001a).

2.3 Modelos espectrais

Nos estudos da vegetação, através de técnicas de sensoriamento remoto, é muito comum o uso da reflectância da superfície (definida como a porção da radiação solar incidente que é refletida pela superfície) devido à facilidade desta ser medida remotamente, e principalmente devido às respostas características da vegetação que a tornam facilmente distinguível de outros alvos. Os valores de reflectância podem ser transformados em índices de vegetação, os quais são utilizados, entre outras finalidades, para o estabelecimento de padrões de crescimento e desenvolvimento ao longo do tempo.

O uso destes índices se fundamenta no fato de que o crescimento e o desenvolvimento da vegetação são funções da energia absorvida e, em última instância, estão associados à energia refletida e captada pelo sensor remoto. A maior parte dos índices de vegetação apresentados na literatura utilizam a razão entre as reflectâncias de duas faixas de comprimento de onda, ou bandas: visível (350-700nm) e infravermelho próximo (730-1100nm). Os comprimentos de onda da faixa do visível mais utilizados são os que correspondem à banda do vermelho (570-700nm), pois é justamente nesta faixa de comprimento de onda que as diferenças entre espécies vegetais e as diferenças entre estádios de desenvolvimento de uma mesma espécie são mais facilmente detectáveis.

Frente ao fator crescimento vegetal, a resposta da vegetação nestas duas bandas é distinta (Baret & Guyot, 1991). Na medida em que a planta se desenvolve ocorre uma diminuição na energia refletida no vermelho, pela maior absorção devido ao incremento nos pigmentos, e um aumento na energia refletida no infravermelho, devido ao efeito de reflectância aditiva. Este padrão de comportamento determina a existência de uma relação proporcional entre acúmulo de biomassa e índice de vegetação.

Entre os diversos índices de vegetação propostos, possivelmente, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), ou índice de vegetação por diferença normalizada (Rouse et al., 1973), seja o mais utilizado. O NDVI é expresso por:

$$NDVI = \frac{(\rho_{iv} - \rho_v)}{(\rho_{iv} + \rho_v)} \quad (1)$$

onde ρ_{iv} e ρ_v são as reflectâncias nos comprimentos de onda do infravermelho e do vermelho, respectivamente.

O desenvolvimento fenológico determina mudanças estruturais da vegetação ao longo da estação de crescimento, as quais resultam em correspondentes mudanças gradativas na reflectância, definindo um perfil espectral para a mesma. A caracterização dos perfis espectrais permite a diferenciação entre as espécies vegetais, enquanto que as mudanças na forma do perfil característico de uma determinada vegetação podem estar associadas à condição da mesma (Justice et al., 1991; Eidenshink & Hass, 1992).

Em geral, a utilização do índice de vegetação integrado num determinado período do desenvolvimento das culturas, ou ainda, em todo o seu ciclo, tem gerado boas relações com parâmetros agronômicos, como rendimento, pois contemplam a história da evolução da biomassa (Rasmussen, 1992; Masseli et al., 1993).

As propriedades espectrais contidas em imagens de satélites, especialmente aqueles com alta resolução temporal, como a dos sensores a bordo dos satélites da série NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*), podem ser utilizadas para o monitoramento das condições de crescimento da vegetação ao longo do ciclo da cultura, assim como para estimar seu rendimento (Masseli et al., 1993). O sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), a bordo dos satélites da série NOAA, possivelmente seja o mais adequado para o fornecimento de dados quantitativos em grandes áreas. Inicialmente este sensor foi concebido para estudos meteorológicos, tendo,

posteriormente, despertado grande interesse da comunidade científica de ecossistemas terrestres, especialmente da dinâmica da vegetação.

O sensor AVHRR apresenta características extremamente úteis, como a cobertura global da Terra em escala diária, o que reduz problemas devido à cobertura de nuvens e fornece informações em intervalos de tempo compatível com a sucessão de fases da vegetação. Masseli et al. (1993) propuseram a utilização de composições de imagens de máximo NDVI de determinados períodos para avaliar as condições da vegetação nos mesmos. Os satélites da série NOAA apresentam, ainda, uma série de dados de mais de 20 anos, o que possibilita um acompanhamento das condições da vegetação ao longo de grandes períodos de tempo.

Os dados provenientes do sensor AVHRR/NOAA são recebidos com resolução espacial total (1,1km no nadir) e armazenados em duas diferentes formas. Alguns dados, selecionados, são gravados em resolução total, referenciados com formato LAC (*Local Area Coverage*). Todos os dados, entretanto, são amostrados para a resolução de 4,0 km e armazenados sob forma GAC (*Global Area Coverage*) (Kidwell, 1990). É importante salientar que mesmo com esta resolução, aparentemente “grosseira”, em nível conceitual, há compatibilidade nas escalas das observações remotas e dos fenômenos ambientais de grande escala, visto que eventos meteorológicos, a exemplo de secas e enchentes, afetam áreas maiores do que a resolução referida.

Rudorff & Batista (1990a) avaliaram o potencial da utilização de dados espectrais (índices de vegetação) para estimar os rendimentos da cultura do trigo, no Estado de São Paulo. Os autores obtiveram coeficientes de correlação de 0,82

e 0,93 entre os índices de vegetação obtidos nos estádios de emborrachamento e início do florescimento, respectivamente, e o rendimento final de grãos, concluindo que a energia refletida em determinados estádios de desenvolvimento e em certos comprimentos de onda tem boa relação com os rendimentos finais da cultura.

Para as culturas do sorgo e do milho, Masseli et al. (1993) propuseram uma metodologia de utilização de imagens de NDVI para monitorar o desenvolvimento e estimar o rendimento destas culturas. O trabalho foi conduzido na região do Sahel, Níger, e as estimativas do rendimento final de grãos (sorgo e milho) apresentaram um erro médio em torno de 80kg/ha.

Fontana (1995), em um estudo preliminar, correlacionou o GVI (Índice de Vegetação Global) com os rendimentos da cultura da soja nos anos de 1983 a 1986. Este índice apresentou boa correlação com o rendimento, sendo que, em anos em que ocorreram deficiências hídricas, os valores de GVI foram menores. O autor concluiu que a disponibilidade hídrica é uma variável eficiente para indicar as variações no rendimento da soja no Rio Grande do Sul.

2.4 Modelos agrometeorológico-espectrais

Alguns autores propuseram a incorporação de um termo espectral ao modelo agrometeorológico, o qual é obtido através de imagens de satélite, gerando os denominados modelos agrometeorológico-espectrais. Nestes modelos, segundo Rudorff & Batista (1990b), o componente agrometeorológico

expressa as condições de radiação solar incidente, temperatura e umidade do ar e disponibilidade hídrica, enquanto que o componente espectral expressa as diferenças de práticas de manejo, cultivares e estresses não incluídos no modelo agrometeorológico.

No Brasil, Rudorff & Batista (1990b) foram os primeiros a utilizar este tipo de modelo. Os autores avaliaram a performance de um modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de cana-de-açúcar, no interior do Estado de São Paulo, comparado a um modelo baseado apenas em dados espectrais e outro baseado apenas em dados agrometeorológicos. O resultado obtido foi uma melhoria na estimativa quando da utilização dos dois modelos de forma conjunta.

Posteriormente, Fontana et al. (1998), em estudo preliminar, testaram o uso de um modelo agrometeorológico-espectral para estimar o rendimento da soja no Rio Grande do Sul. Os autores verificaram que a disponibilidade hídrica é o fator mais importante na definição do rendimento da soja, sendo expresso tanto no componente agrometeorológico como no espectral. Foram verificadas melhorias de 6 a 12% na estimativa de rendimento da cultura a partir da incorporação do componente espectral ao modelo agrometeorológico, em relação à utilização destes separadamente.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Região de estudo

A região de estudo corresponde à área de produção significativa de soja do Estado do Rio Grande do Sul definida por Berlato & Fontana (1999). Esta região (Figura 2), responsável, em média, por 90% do total da produção da cultura da soja no Estado, está localizada na parte norte-noroeste do Rio Grande do Sul, compreendida entre as latitudes 27°04'S e 29°35'S e as longitudes 51°17'W e 55°46'W. A produção de soja desta região no ano agrícola 2000/2001 foi de 5.672 mil toneladas (81,8% da produção total de soja do Estado) com um rendimento médio de 2.366kg/ha (EMATER, 2002). Os rendimentos médios da cultura da soja desta região possuem alta correlação com os rendimentos médios obtidos no Estado.

A região de estudo possui 210 municípios de acordo com a divisão municipal do ano de 2000, indicados na Tabela 4. Destes 210 municípios, somente Lagoão não apresentou continuidade na produção de soja ao longo dos anos.

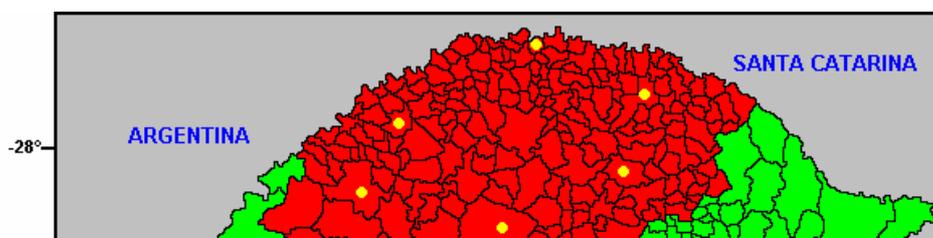


FIGURA 2. Municípios do Estado do Rio Grande do Sul. Em vermelho está representada a região de produção significativa de soja. Fonte: Berlato & Fontana, 1999.

TABELA 4. Municípios integrantes da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul.

Água Santa	David Canabarro	Mariano Moro	Santo Augusto
Ajuricaba	Derrubadas	Mato Castelhano	Santo Cristo
Alecrim	Dezesseis de Novembro	Maximiliano de Almeida	Santo Expedito do Sul
Alegria	Dois Irmãos das Missões	Miraguaí	São Domingos do Sul
Alpestre	Doutor Maurício Cardoso	Mormaço	São João da Urtiga
Alto Alegre	Engenho Velho	Muliterno	São José das Missões
Ametista do Sul	Entre Rios do Sul	Não-Me-Toque	São José do Herval
Aratiba	Entre-Ijuís	Nicolau Vergueiro	São José do Inhacorá
Augusto Pestana	Erebango	Nonoai	São José do Ouro
Áurea	Erechim	Nova Boa Vista	São Luiz Gonzaga
Barão de Cotegipe	Ernestina	Nova Candelária	São Martinho
Barra do Guarita	Erval Grande	Nova Ramada	São Miguel das Missões
Barra do Rio Azul	Erval Seco	Novo Barreiro	São Nicolau
Barra Funda	Esperança do Sul	Novo Machado	São Paulo das Missões
Barracão	Espumoso	Novo Tiradentes	São Pedro do Butiá
Barros Cassal	Estação	Paim Filho	São Valentim
Benjamin Constant do Sul	Eugênio de Castro	Palmeira das Missões	São Valério do Sul
Boa Vista das Missões	Faxinalzinho	Palmitinho	Sarandi
Boa Vista do Buricá	Floriano Peixoto	Panambi	Seberi
Bom Progresso	Fontoura Xavier	Passo Fundo	Sede Nova

Continuação TABELA 4. Municípios integrantes da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul.

Bossoroca	Fortaleza dos Valos	Pejuçara	Selbach
Braga	Frederico Westphalen	Pinhal	Senador Salgado Filho

Cacique Doble	Gaurama	Pinhal Grande	Sertão
Caibaté	Gentil	Pinheirinho do Vale	Sete de Setembro
Caçara	Getúlio Vargas	Pirapó	Severiano de Almeida
Camargo	Girúá	Planalto	Soledade
Campina das Missões	Gramado dos Loureiros	Pontão	Tapejara
Campinas do Sul	Guarani das Missões	Ponte Preta	Tapera
Campo Novo	Horizontina	Porto Lucena	Taquaruçu do Sul
Campos Borges	Humaitá	Porto Mauá	Tenente Portela
Cândido Godói	Ibiaçá	Porto Vera Cruz	Tiradentes do Sul
Carazinho	Ibiraiaras	Porto Xavier	Três Arroios
Carlos Gomes	Ibirapuitã	Quevedos	Três de Maio
Casca	Ibirubá	Quinze de Novembro	Três Palmeiras
Caseiros	Ijuí	Redentora	Três Passos
Catuípe	Independência	Rio dos Índios	Trindade do Sul
Centenário	Inhacorá	Rodeio Bonito	Tucunduva
Cerro Grande	Ipiranga do Sul	Ronda Alta	Tunas
Cerro Largo	Iraí	Rondinha	Tupanci do Sul
Chapada	Itacurubi	Roque González	Tupanciretã
Charrua	Itatiba do Sul	Sagrada Família	Tuparendi
Chiapeta	Jaboticaba	Saldanha Marinho	Ubiretama
Ciriaco	Jacutinga	Salto do Jacuí	Unistalda
Colorado	Jarí	Salvador das Missões	Vanini
Condor	Jóia	Sananduva	Viadutos
Constantina	Júlio de Castilhos	Santa Bárbara do Sul	Vicente Dutra
Coqueiros do Sul	Lagoa dos Três Cantos	Santa Rosa	Victor Graeff
Coronel Barros	Lagoão	Santiago	Vila Lângaro
Coronel Bicaco	Lajeado do Bugre	Santo Ângelo	Vila Maria
Coxilha	Liberato Salzano	Santo Antônio das Missões	Vista Alegre
Crissiumal	Machadinho	Santo Antônio do Palma	Vista Gaúcha
Cristal do Sul	Marau	Santo Antônio do Planalto	Vitória das Missões
Cruz Alta	Marcelino Ramos		

3.1.1 Solos

O relevo predominante na região de estudo é suave ondulado, com altitudes médias em torno de 465m. Os solos pertencem, basicamente, a seis subordens, sendo que a que mais ocorre é a Latossolo Vermelho, presente em, aproximadamente, 52,4% da região de estudo. Também podem ser encontradas áreas com Chernossolo Argilúvico (19,1%), Neossolo Litólico (15,8%), Argissolo Vermelho-Amarelo (8,0%), Nitossolo Vermelho (4,5%) e, em menor quantidade, Latossolo Bruno (0,2%). A determinação do percentual da área ocupada por cada subordem foi realizada em um arquivo vetorial de distribuição e classificação dos solos do Estado do Rio Grande do Sul (EMATER), no *software* IDRISI. A nomenclatura das subordens está de acordo com o SiBCS (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos) (EMBRAPA, 1999).

3.1.2 Clima

O clima da região é do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen (1948), que corresponde a um clima subtropical, com precipitação pluvial bem distribuída em todos os meses do ano, e com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C (Moreno, 1961). A temperatura média anual é de 18,7°C, sendo que a temperatura máxima média é de 25,7°C e a temperatura mínima média é de 13,2°C. O mês mais quente é janeiro, no qual a temperatura média é de 23,7°C. A média de precipitação pluvial ao longo do ano é de 1.680mm, sendo que o mês que apresenta menores médias de precipitação pluvial é agosto, com 118mm, e o mês que apresenta maiores médias de precipitação pluvial é outubro, com 173mm. Estes valores correspondem à normal climatológica 1931-1960 (Rio Grande do Sul, 1989).

3.2 Dados

3.2.1 Dados meteorológicos

Foram coletados dados de sete estações meteorológicas (Figura 2 e Tabela 5) localizadas em municípios da região de estudo, pertencentes às redes do 8º DISME/INMET (8º Distrito de Meteorologia/Instituto Nacional de Meteorologia) e da FEPAGRO/SCT (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária/Secretaria da Ciência e Tecnologia).

TABELA 5. Coordenadas geográficas das estações meteorológicas localizadas na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul e órgão responsável pela coleta de dados

Estação	Latitude	Longitude	Altitude	Órgão responsável
---------	----------	-----------	----------	-------------------

Cruz Alta	-28° 38`	-53° 36`	472 m	8° DISME/INMET
Erechim	-27° 37`	-52° 16`	760 m	FEPAGRO
Iraí	-27° 11`	-53° 14`	222 m	8° DISME/INMET
Júlio de Castilhos	-29° 13`	-53° 40`	514 m	FEPAGRO
Passo Fundo	-28° 15`	-52° 24`	667 m	8° DISME/INMET
Santa Rosa	-27° 51`	-54° 25`	360 m	FEPAGRO
São Luiz Gonzaga	-28° 23`	-54° 58`	260 m	8° DISME/INMET

Os dados meteorológicos foram coletados em nível diário no período de janeiro de 1975 a maio de 2000 e constaram de: temperaturas do ar máxima e mínima (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento ($m.s^{-1}$ e $km.dia^{-1}$), precipitação pluvial (mm) e insolação (horas e décimos).

A temperatura média foi calculada através da média aritmética simples entre as temperaturas máximas e mínimas de cada dia. A umidade relativa foi coletada nos três horários de observação (12:00h, 18:00h e 24:00h TMG) e calculada a média aritmética simples para a obtenção do valor médio diário.

Para cada elemento meteorológico foram calculadas as médias ou as somas para período decendial em cada estação meteorológica.

Os valores decendiais de insolação foram utilizados como estimadores da radiação solar global através da aplicação da equação de Ångstron, utilizando os coeficientes ajustados por Fontana & Oliveira (1996) para o Rio Grande do Sul.

3.2.2 Imagens NOAA

Foram utilizadas imagens de máximo NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) mensal, obtidas pelo sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo do satélite NOAA (*National Oceanographic*

and Atmospheric Administration), adquiridas do Clark Labs da Clark University (USA), com as correções radiométricas e geométricas já processadas.

As imagens do período de novembro de 1981 a maio de 2000 possuem abrangência de toda a superfície do planeta, com uma resolução espacial de 9x9km. Nestas imagens foram realizados recortes e geradas imagens com 86 colunas e 72 linhas, entre as latitudes 26°54'S e 34°06'S e as longitudes 49°18'W e 57°54'W, cobrindo todo o Estado do Rio Grande do Sul.

As imagens, expressas em contadores digitais (0 a 253), foram convertidas para valores de NDVI (-0,2 a 0,73) através da seguinte expressão:

$$NDVI_{img} = \left[\left(\frac{0,93}{253} \right) * CD \right] - 0,2 \quad (2)$$

onde, CD é o valor do contador digital de cada *pixel* na imagem original e $NDVI_{img}$ é o valor de índice de vegetação de cada *pixel* nas imagens transformadas.

Dois *bits* das imagens originais foram reservados para representar *pixels* correspondentes a alvos não terrestres (lagos, rios, mares, etc.) e ausência de dados.

3.2.3 Estatísticas oficiais

Foram coletados, nos anuários estatísticos do IBGE (instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), os valores dos rendimentos médios de soja observados em cada município da região de estudo no período de 1981 a 1996.

Através de consulta à página oficial do IBGE na *internet* foram obtidos dados de rendimento médio, área colhida e produção total de soja, nos municípios pertencentes à região de estudo, no período de 1997 a 2000. Também foram obtidos os valores de rendimento médio da cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1975 a 2000.

Através de consulta à página oficial da FAMURS (Federação das Associações de Municípios do Rio Grande do Sul), foram obtidos dados de área municipal de 1980 a 2000, bem como dados relativos às emancipações ocorridas neste período (data da emancipação e município ou municípios de origem) de todos os municípios da região de estudo.

3.3 Análises

3.3.1 Agrupamento dos municípios segundo o rendimento, produção e área colhida de soja

Para as análises de agrupamento foram utilizados os dados de área municipal, rendimento médio, área colhida e produção total de soja no período de 1997 a 2000. A definição do período ficou restrita a quatro anos devido à descontinuidade da série de dados, como consequência do número elevado de emancipações municipais ocorridas na região.

A análise de agrupamento foi realizada através do método de Ward, utilizando como medida de dissimilaridade a distância Euclidiana. Os municípios foram agrupados quanto ao rendimento, à produção e quanto à razão entre a área colhida de soja e a área total do município. A análise dos dados e divisão dos grupos foi feita utilizando o *software* SPSS, sendo o resultado dos agrupamentos

obtido na forma de dendrogramas. Foi realizado um corte nos dendrogramas de maneira que fossem definidos três grandes grupos em cada análise realizada: grupos de alto, médio e baixo rendimento de soja (kg/ha); grupos de alta, média e baixa produção de soja (toneladas); e grupos de alta, média e baixa razão entre área cultivada com soja e área do município. Para cada grupo foram calculados os valores médios, máximos e mínimos das variáveis de agrupamento. Os resultados dos agrupamentos, no entanto, foram representados na forma de mapas para uma melhor visualização da distribuição espacial dos grupos.

Nos grupos gerados a partir do agrupamento realizado com base nos rendimentos médios foi analisada a variabilidade do rendimento de soja e dos valores de NDVI no período de 1982 a 2000. Os anos anteriores a 1982 não foram incluídos na análise por indisponibilidade de imagens de satélite.

3.3.2 Mapeamento do rendimento

Devido ao grande número de emancipações municipais ocorridas na região nas duas últimas décadas foi necessário realizar a recuperação regressiva dos rendimentos dos municípios. Nesta recuperação, foram considerados apenas os municípios que tiveram sua área total oriunda de apenas um município, os quais assumiram os valores de rendimento do município de origem. Municípios que emanciparam de dois ou mais municípios foram desconsiderados. O período compreendido na recuperação destes dados foi de 1981 a 2000.

Após a recuperação dos valores de rendimento foram gerados, no *software* Carta Linx, arquivos vetoriais de rendimento médio observado para cada ano da série, em função da divisão municipal existente em cada ano. Estes

arquivos vetoriais foram exportados para o *software* IDRISI e transformados em imagens com 86 colunas e 72 linhas, entre as latitudes 26°54'S e 34°06'S e as longitudes 49°18'W e 57°54'W, com resolução espacial de 9x9km.

3.3.3 Ajuste do modelo

O modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja foi concebido pela adição de dois termos, o agrometeorológico e o espectral:

$$Y = a + b TA + c TE \quad (3)$$

onde Y é o rendimento estimado pelo modelo agrometeorológico-espectral, TA corresponde ao termo agrometeorológico, TE corresponde ao termo espectral e a , b e c são os parâmetros da equação.

Os parâmetros do modelo foram determinados através de regressão linear múltipla, calculada no *software* Excel, entre os valores dos termos agrometeorológico, espectral e os rendimentos de soja obtidos de estatísticas oficiais do IBGE no Estado do Rio Grande do Sul em cada ano agrícola. Foi utilizado para o ajuste do modelo o período de 1982 a 2000, excetuando-se o ano de 1995, por não apresentar disponibilidade de imagens de satélite. Para a validação do modelo foram selecionados aleatoriamente cinco anos deste período (1982, 1985, 1990, 1991 e 1997).

3.3.3.1 Obtenção do termo agrometeorológico

O termo agrometeorológico foi obtido pelo ajuste do modelo multiplicativo de Jensen (1968), modificado por Berlato (1987), no qual a variável independente é a evapotranspiração relativa, dado por:

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_r}{ET_o} \right)_i^{\lambda_i} \quad (4)$$

onde (Y/Y_m) é o rendimento relativo, (ET_r/ET_o) é a evapotranspiração relativa em cada período i (meses) e λ_i é o expoente que expressa a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico durante o período i .

Para o ajuste do termo agrometeorológico foi utilizada uma série de dados de 1975 a 2000, sendo que os anos utilizados para a validação deste foram coincidentes com os anos utilizados para a validação do modelo agrometeorológico-espectral.

a) cálculo do rendimento relativo

O rendimento relativo foi obtido pela razão entre os valores de rendimento médio da cultura da soja observados no Estado do Rio Grande do Sul, oriundos das estatísticas oficiais do IBGE, e o rendimento médio máximo verificado na série, que foi de 2.088kg/ha, ocorrido no ano de 1998.

b) cálculo da evapotranspiração relativa

A evapotranspiração relativa foi dada pela razão entre ET_r (evapotranspiração real) e ET_o (evapotranspiração de referência).

A determinação da ET_o , para cada estação meteorológica, foi feita, em nível decendial, através do método de Penman (1956), utilizando a equação de

conversão da radiação solar global em saldo de radiação proposta por Bergamaschi & Guadagnin (1990), a qual foi ajustada sobre superfície gramada.

Os valores de ETr foram calculados, também em nível decendial, através do balanço hídrico meteorológico de Thornthwaite-Mather (1955), utilizando uma capacidade de água disponível (CAD) de 75mm.

Obtidos os valores decendiais de ETr e de ETo, foram calculados os valores de evapotranspiração relativa (ETr/ETo) para cada estação meteorológica, em nível decendial. O valor mensal de evapotranspiração relativa foi obtido através da média aritmética dos valores decendiais de ETr/ETo.

c) determinação dos expoentes do modelo de Jensen modificado

Os expoentes foram obtidos através do ajuste da equação de regressão linear múltipla das transformadas logarítmicas do rendimento relativo (Y/Y_m) da soja no Estado e da evapotranspiração relativa (ETr/ETo) média da região de estudo, na equação (4), passando pela origem. Foram utilizados para o cálculo dos expoentes somente os valores médios mensais de ETr/ETo dos meses que apresentaram maiores correlações com os rendimentos médios da cultura da soja. O cálculo da regressão linear múltipla foi realizado no *software* Excel.

d) espacialização do modelo de Jensen modificado

Os valores mensais de ETr/ETo, calculados em cada estação meteorológica, foram espacializados na região de estudo, para cada mês, através

de interpolação espacial pelo método Kriging, utilizando o *software* Surfer. A interpolação gerou grades de valores de evapotranspiração relativa que foram exportadas para o *software* IDRISI em formato ASCII e transformadas em imagens de ETr/ETo.

As imagens de ETr/ETo corresponderam à região entre as latitudes 26°54'S e 34°06'S e as longitudes 49°18'W e 57°54'W, com 86 colunas e 72 linhas, abrangendo uma área maior do que a região de estudo. Como os valores calculados para fora da região de estudo não interessavam ao trabalho, além de não serem válidos por estarem muito distantes dos pontos utilizados na interpolação, foi realizado um recorte (mascaramento) que preservou apenas os valores de ETr/ETo contidos dentro da região de estudo. Este procedimento foi realizado para cada mês utilizado no ajuste do termo agrometeorológico.

O rendimento de soja estimado em cada ano, através do modelo de Jensen modificado, foi obtido pela multiplicação do máximo rendimento médio da soja no Estado verificado na série estudada pelas imagens mensais de (ETr/ETo) elevadas aos expoentes (λ) de cada mês. Foram geradas imagens apenas para o período de 1982 a 2000 de forma a compatibilizar com a disponibilidade de imagens de satélite.

e) cálculo do fator de correção

A aplicação do termo agrometeorológico gera potencialmente regiões de super e subestimativa de rendimentos, pois a regressão para a determinação dos expoentes que indicam a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico de cada período foi realizada sobre um único valor máximo de rendimento médio para toda a região. Devido à existência de áreas com diferentes níveis de rendimento foi

introduzido um fator de correção (FC) a estas imagens, calculado através da expressão:

$$FC = \frac{RO}{RE} \quad (5)$$

onde, RO é o rendimento observado em cada *pixel* e RE é o rendimento estimado em cada *pixel* pelo modelo de Jensen modificado (equação 4).

O valor final do fator de correção de cada *pixel* foi obtido pela média aritmética dos valores do fator de correção em cada *pixel* no período de 1982 a 2000, excetuando-se os anos da série de validação.

A partir da aplicação dos fatores de correção às imagens de estimativa do rendimento pelo modelo de Jensen modificado, foram geradas as imagens de estimativa do rendimento através do termo agrometeorológico. Foram, então, extraídos os valores médios da estimativa do rendimento para a região de estudo, em cada ano, dos períodos de ajuste e de validação.

3.3.3.2 Obtenção do termo espectral

Inicialmente foi feita uma análise de correlação simples, mês a mês, entre os valores médios de NDVI máximo da região de estudo, extraídos das imagens de satélite, e os rendimentos observados em cada ano da série estudada. O valor do termo espectral foi definido como sendo o valor médio do

NDVI máximo mensal dos meses que apresentaram os maiores coeficientes de correlação.

3.3.4 Verificação da acurácia das estimativas

Após a obtenção das imagens de estimativas do rendimento da soja através do modelo agrometeorológico-espectral foram calculados os desvios entre os rendimentos médios estimados e os rendimentos médios observados.

Foram calculados os desvios das estimativas para cada *pixel* em cada ano, os quais foram representados na forma de imagens de desvios positivos e negativos e de histogramas de frequência dos valores absolutos dos desvios. Foram, por fim, calculadas as médias dos desvios absolutos para os períodos de ajuste e validação do modelo agrometeorológico-espectral.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatísticas oficiais

Neste item serão apresentados resultados obtidos em análises feitas utilizando dados relativos à cultura da soja provenientes de estatísticas oficiais do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

4.1.1 Análises de agrupamento

As análises de agrupamento dos municípios, quanto ao rendimento, produção e percentual de área cultivada com soja, realizadas através do método de Ward, geraram dendrogramas com tantos níveis de agrupamentos quanto o número de municípios analisados. O corte realizado nos dendrogramas reduziu o número de grupos para apenas três, em cada variável analisada.

4.1.1.1 Grupos baseados no rendimento médio de soja

Como resultado da análise de agrupamento do rendimento era esperada uma distribuição bastante heterogênea dos municípios dentro da região de estudo, devido ao fato do rendimento de determinado município não apresentar características evidentes de relação com o rendimento dos municípios vizinhos. No entanto, como pode-se observar na Figura 3, esta variável apresentou agrupamentos bem definidos. Os grupos “A”, “B” e “C”

corresponderam aos municípios que apresentaram maiores níveis de rendimento, níveis de rendimento médios e menores níveis de rendimento, respectivamente.

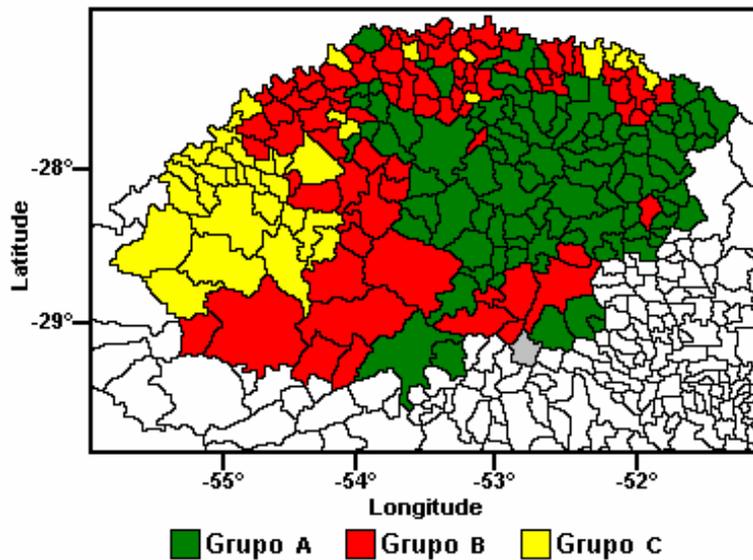


FIGURA 3. municípios da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul agrupados, pelo método de Ward, considerando o **rendimento médio**. Período: 1997-2000 (Fonte de dados: IBGE).

Observa-se que a porção oeste da região de estudo apresentou os municípios com menores níveis de rendimento, enquanto que as porções norte e centro-sul apresentaram rendimentos médios e a porção centro-leste apresentou os maiores níveis de rendimento. Esta definição de áreas, com diferentes níveis de rendimento, pode ser atribuída a fatores climáticos, de solo (material de origem, fertilidade, capacidade de armazenamento de água, etc.) ou manejo (tecnologia empregada, cultivar, etc.).

Nota-se que a distribuição espacial dos grupos dentro da região de estudo está relacionada com o zoneamento agroclimático da soja no Estado do Rio Grande do Sul (Figura 4).

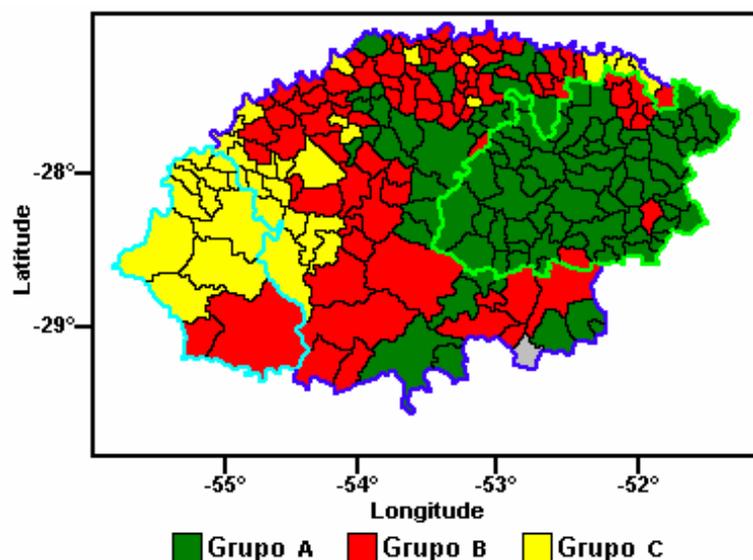


FIGURA 4. Municípios da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul agrupados, pelo método de Ward, considerando o rendimento médio, comparados ao zoneamento agroclimático para a cultura no Estado.

É possível notar que o grupo “B” ocupou a maior parte da zona Preferencial – I (Figura 3), onde, segundo o zoneamento agroclimático, não existem restrições ao desenvolvimento da soja. Já o grupo “A” ocupou a maior parte da zona Tolerada – II, onde a restrição ao desenvolvimento da soja se dá por reduzido número de soma térmica (temperaturas acima de 15°C), impondo à cultura uma redução na estação de crescimento. Isto pode evidenciar que a temperatura exerce muito maior influência na duração do ciclo da cultura do que no rendimento final de grãos, sendo que, a utilização de variedades precoces adaptadas às condições térmicas da região, evita que os rendimentos sejam reduzidos. Estes resultados sugerem a realização de uma revisão do zoneamento agroclimático para a cultura da soja. O grupo “C” localizou-se principalmente na zona Tolerada – III, onde as restrições se dão por deficiência hídrica, que pode

atingir 100mm, e é o principal fator que promove a redução dos rendimentos de grãos.

O resultado desta análise, no entanto, coincidiu com o zoneamento agrícola para a soja no Rio Grande do Sul proposto por Cunha et al. (2001), que foi baseado, quase que exclusivamente, na disponibilidade hídrica para a cultura. Neste zoneamento as regiões que apresentaram menores valores de ETr/ETm (sendo ETr e ETm correspondentes a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima, respectivamente), ou ISNA (índice de satisfação das necessidades de água), estão localizadas, com maior frequência, na parte oeste da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul, sendo esta localização dependente da CAD (capacidade de água disponível) dos solos e da época de semeadura.

Na Tabela 6 são apresentadas as estatísticas dos três grupos analisados quanto ao rendimento médio de grãos. O grupo “A” apresentou um rendimento médio de 1.923kg/ha, enquanto que os grupos “B” e “C” apresentaram rendimentos médios de 1.524 e 1.116kg/ha, respectivamente. Observa-se que o rendimento médio dos municípios pertencentes ao grupo “C” foi inferior ao rendimento mínimo observado no grupo “A”.

TABELA 6. Valores médio, máximo e mínimo do **rendimento médio** da soja na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período 1997-2000, município que os apresentou e ano de ocorrência.

Grupo	Rendimento	Município	Ano
Estatística	(kg/ha)		
Grupo A			
Média	1.923		
Máximo	2.700	Cacique Doble*, Casca**, Sananduva*, Vanini**	1998* e 2000**
Mínimo	1.200	Barracão**, Machadinho**, Muliterno*	1997* e 1999**
Grupo B			

Média	1.524		
Máximo	2.340	Caiçara	1998
Mínimo	300	Pinheirinho do Vale	1999
Grupo C			
Média	1.116		
Máximo	2.220	Salvador das Missões	1998
Mínimo	359	Dezesseis de Novembro	2000

Nas Tabelas 7, 8 e 9 são listados os municípios que pertencem a cada grupo definido nesta análise de agrupamento.

TABELA 7. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “A” (maior rendimento de soja).

Água Santa	Engenho Velho	Mormaço	Santo Augusto
Alto Alegre	Erebango	Muliterno	Santo Expedito do Sul
Barão de Cotegipe	Erechim	Não-Me-Toque	São Domingos do Sul
Barra Funda	Ernestina	Nicolau Vergueiro	São João da Urtiga
Barracão	Estação	Nonoai	São José das Missões
Barros Cassal	Faxinalzinho	Nova Boa Vista	São José do Herval
Bom Progresso	Florianópolis	Paim Filho	São José do Ouro
Cacique Doble	Fontoura Xavier	Palmeira das Missões	São Valério do Sul
Camargo	Fortaleza dos Valos	Panambi	Sarandi
Campinas do Sul	Gentil	Passo Fundo	Seberi
Campo Novo	Getúlio Vargas	Pejuçara	Sede Nova
Carazinho	Humaitá	Pinhal Grande	Selbach
Casca	Ibiaçá	Pontão	Sertão
Caseiros	Ibiraiaras	Ponte Preta	Tapejara
Chapada	Ibirubá	Quinze de Novembro	Tapera
Charrua	Inhacorá	Ronda Alta	Taquaruçu do Sul
Colorado	Ipiranga do Sul	Rondinha	Três Palmeiras
Condor	Jacutinga	Sagrada Família	Trindade do Sul
Constantina	Júlio de Castilhos	Saldanha Marinho	Tupanci do Sul
Coqueiros do Sul	Lagoa dos Três Cantos	Sananduva	Vanini
Coronel Bicaco	Machadinho	Santa Bárbara do Sul	Victor Graeff
Coxilha	Marau	Santo Antônio do Palma	Vila Lângaro
David Canabarro	Mato Castelhana	Santo Antônio do Planalto	Vila Maria
Derrubadas			

TABELA 8. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “B” (médio rendimento de soja).

Ajuricaba	Cristal do Sul	Jóia	Santiago
Alpestre	Cruz Alta	Lajeado do Bugre	Santo Ângelo
Augusto Pestana	Dois Irmãos das Missões	Liberato Salzano	Santo Cristo
Áurea	Doutor Maurício Cardoso	Maximiliano de Almeida	São Martinho
Barra do Guarita	Entre Rios do Sul	Miraguaí	São Valentim
Barra do Rio Azul	Erval Grande	Nova Candelária	Sete de Setembro
Benjamin Constant do Sul	Erval Seco	Nova Ramada	Soledade
Boa Vista das Missões	Esperança do Sul	Novo Barreiro	Tenente Portela
Boa Vista do Buricá	Espumoso	Novo Machado	Três Arroios
Braga	Frederico Westphalen	Novo Tiradentes	Três de Maio
Caiçara	Gaurama	Pinhal	Três Passos

Campos Borges	Gramado dos Loureiros	Pinheirinho do Vale	Tucunduva
Cândido Godói	Horizontina	Planalto	Tunas
Carlos Gomes	Ibirapuitã	Porto Mauá	Tupanciretã
Catuípe	Ijuí	Quevedos	Tuparendi
Centenário	Independência	Redentora	Unistalda
Chiapeta	Iraí	Rio dos Índios	Viadutos
Ciríaco	Itatiba do Sul	Rodeio Bonito	Vicente Dutra
Coronel Barros	Jaboticaba	Salto do Jacuí	Vista Alegre
Crissiumal	Jarí	Santa Rosa	Vista Gaúcha

TABELA 9. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “C” (menor rendimento de soja).

Alecrim	Dezesseis de Novembro	Pirapó	São Miguel das Missões
Alegria	Entre-Ijuís	Porto Lucena	São Nicolau
Ametista do Sul	Eugênio de Castro	Porto Vera Cruz	São Paulo das Missões
Aratiba	Girúá	Porto Xavier	São Pedro do Butiá
Bossoroca	Guarani das Missões	Roque González	Senador Salgado Filho
Caibaté	Itacurubi	Salvador das Missões	Severiano de Almeida
Campina das Missões	Marcelino Ramos	Santo Antônio das Missões	Tiradentes do Sul
Cerro Grande	Mariano Moro	São José do Inhacorá	Ubiretama
Cerro Largo	Palmitinho	São Luiz Gonzaga	Vitória das Missões

4.1.1.2 Grupos baseados na produção de soja.

O resultado desta análise evidenciou que os municípios que apresentaram maior produção de soja (grupo “D”) encontram-se no centro-sul da região de estudo (Figura 5). Já os municípios que apresentaram menor produção de soja (grupo “F”) encontram-se na periferia da região e os municípios que apresentaram média produção de soja (grupo “E”) não apresentaram localização específica, estando distribuídos por toda a região.

Observou-se que alguns dos municípios que apresentaram maior produção de soja são também os que possuem maior área ou rendimento.

O resultado desta análise, em particular, pode auxiliar na escolha de locais para a construção e manutenção de um parque para o armazenamento das safras, para a locação de novas vias de escoamento da produção, assim como para recuperação e manutenção das já existentes.

Na Tabela 10 são apresentadas as estatísticas dos três grupos analisados quanto à produção de grãos. Nota-se que as produções máxima do grupo “F” e média do grupo “E” são inferiores à produção mínima do grupo “D”.

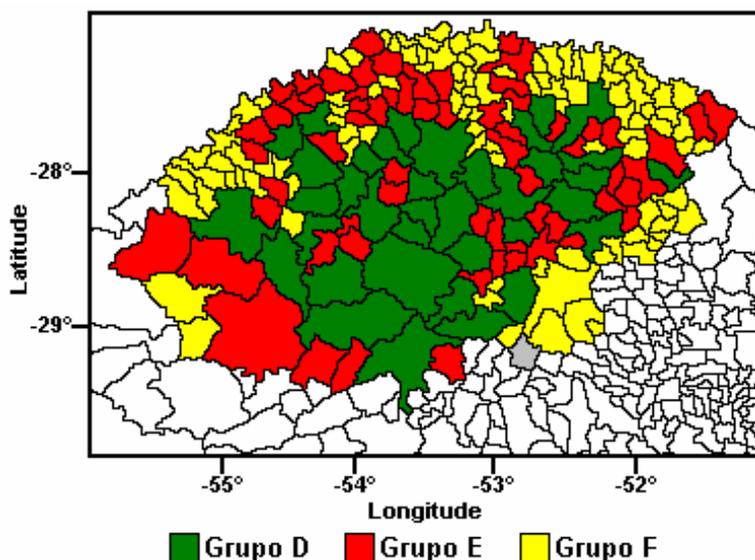


FIGURA 5. Municípios da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul agrupados, pelo método de Ward, considerando a **produção de grãos**. Período: 1997-2000 (Fonte de dados: IBGE).

TABELA 10. Valores médio, máximo e mínimo da **produção** da soja na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período 1997-2000, município que os apresentou e ano de ocorrência.

Grupo	Estatística	Produção (Toneladas)	Município	Ano
Grupo D				
	Média	66.740		
	Máximo	233.100	Cruz Alta	1998
	Mínimo	27.000	Entre-Ijuís	2000
Grupo E				
	Média	22.348		
	Máximo	54.900	Bossoroca	1998
	Mínimo	8.100	Rio dos Índios	1999

Grupo F

Média	5.778		
Máximo	24.300	Vitória das Missões	1998
Mínimo	4	Mariano Moro	2000

Nas Tabelas 11, 12 e 13 são apresentados os municípios que pertencem a cada grupo definido nesta análise de agrupamento.

TABELA 11. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “D” (maior produção de soja).

Campinas do Sul	Erechim	Marau	Santa Bárbara do Sul
Carazinho	Espumoso	Não-Me-Toque	Santa Rosa
Catuípe	Fortaleza dos Valos	Palmeira das Missões	Santo Ângelo
Chapada	Giruí	Panambi	Santo Augusto
Chiapeta	Ibiaçá	Passo Fundo	São Luiz Gonzaga
Condor	Ibirubá	Pejuçara	São Miguel das Missões
Coronel Bicaco	Ijuí	Pontão	Sertão
Coxilha	Jóia	Ronda Alta	Três de Maio
Cruz Alta	Júlio de Castilhos	Salto do Jacuí	Tupanciretã
Entre-Ijuís			

TABELA 12. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “E” (média produção de soja).

Água Santa	Doutor Maurício Cardoso	Nicolau Vergueiro	São José do Ouro
Ajuricaba	Erebango	Nonoai	São Martinho
Augusto Pestana	Ernestina	Nova Ramada	Sarandi
Barracão	Erval Seco	Novo Machado	Seberi
Boa Vista das Missões	Eugênio de Castro	Pinhal Grande	Sede Nova
Bossoroca	Gentil	Quevedos	Selbach
Braga	Getúlio Vargas	Quinze de Novembro	Tapejara
Caibaté	Guarani das Missões	Redentora	Tapera
Campo Novo	Horizontina	Rio dos Índios	Tenente Portela
Cândido Godói	Humaitá	Rondinha	Três Palmeiras
Colorado	Independência	Saldanha Marinho	Três Passos

Continuação TABELA 12. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “E” (média produção de soja).

Constantina	Ipiranga do Sul	Sananduva	Trindade do Sul
Coqueiros do Sul	Jacutinga	Santiago	Tucunduva
Coronel Barros	Jarí	Santo Antônio das Missões	Tuparendi
Crissiumal	Lagoa dos Três Cantos	Santo Antônio do Planalto	Victor Graeff
Derrubadas	Mato Castelhano	Santo Cristo	Vila Lângaro
Dois Irmãos das Missões			

TABELA 13. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “F” (menor produção de soja).

Alecrim	Ciríaco	Maximiliano de Almeida	São José das Missões
Alegria	Cristal do Sul	Miraguaí	São José do Herval
Alpestre	David Canabarro	Mormaço	São José do Inhacorá
Alto Alegre	Dezesseis de Novembro	Muliterno	São Nicolau

Ametista do Sul	Engenho Velho	Nova Boa Vista	São Paulo das Missões
Aratiba	Entre Rios do Sul	Nova Candelária	São Pedro do Butiá
Aurea	Erval Grande	Novo Barreiro	São Valentim
Barão de Cotegipe	Esperança do Sul	Novo Tiradentes	São Valério do Sul
Barra do Guarita	Estação	Paim Filho	Senador Salgado Filho
Barra do Rio Azul	Faxinalzinho	Palmitinho	Sete de Setembro
Barra Funda	Floriano Peixoto	Pinhal	Severiano de Almeida
Barros Cassal	Fontoura Xavier	Pinheirinho do Vale	Soledade
Benjamin Constant do Sul	Frederico Westphalen	Pirapó	Taquaruçu do Sul
Boa Vista do Buricá	Gaurama	Planalto	Tiradentes do Sul
Bom Progresso	Gramado dos Loureiros	Ponte Preta	Três Arroios
Cacique Doble	Ibiraiaras	Porto Lucena	Tunas
Caiçara	Ibirapuitã	Porto Mauá	Tupanci do Sul
Camargo	Inhacorá	Porto Vera Cruz	Ubiretama
Campina das Missões	Irai	Porto Xavier	Unistalda
Campos Borges	Itacurubi	Rodeio Bonito	Vanini
Carlos Gomes	Itatiba do Sul	Roque González	Viadutos
Casca	Jaboticaba	Sagrada Família	Vicente Dutra
Caseiros	Lajeado do Bugre	Salvador das Missões	Vila Maria
Centenário	Liberato Salzano	Santo Antônio do Palma	Vista Alegre
Cerro Grande	Machadinho	Santo Expedito do Sul	Vista Gaúcha
Cerro Largo	Marcelino Ramos	São Domingos do Sul	Vitória das Missões
Charrua	Mariano Moro	São João da Urtiga	

4.1.1.3 Grupos baseados na razão entre a área colhida de soja e a área total do município.

Os municípios que apresentam maior percentual de área colhida de soja em relação à área total do município (grupo “G”) estão localizados na parte central da região de estudo (Figura 6) e são municípios que possuem área pequena ou média. Em torno destes, formando um cinturão, localizam-se os municípios com médio percentual de área colhida de soja (grupo “H”), e na periferia da região encontram-se os municípios com menor área percentual de área colhida de soja (grupo “I”).

Municípios que apresentam baixa razão entre a área cultivada com soja e a área total do município possivelmente possuam pequena área agricultável, devido às limitações impostas pela topografia, solos ou outros fatores. Existe também a possibilidade de que o restante da área do município seja cultivada com outras culturas, principalmente o milho, ou ocupada com

pecuária (principalmente os municípios localizados na porção sudoeste da região de estudo).

Na Tabela 14 são apresentadas as estatísticas dos três grupos analisados quanto à razão entre área colhida de soja e área total do município.

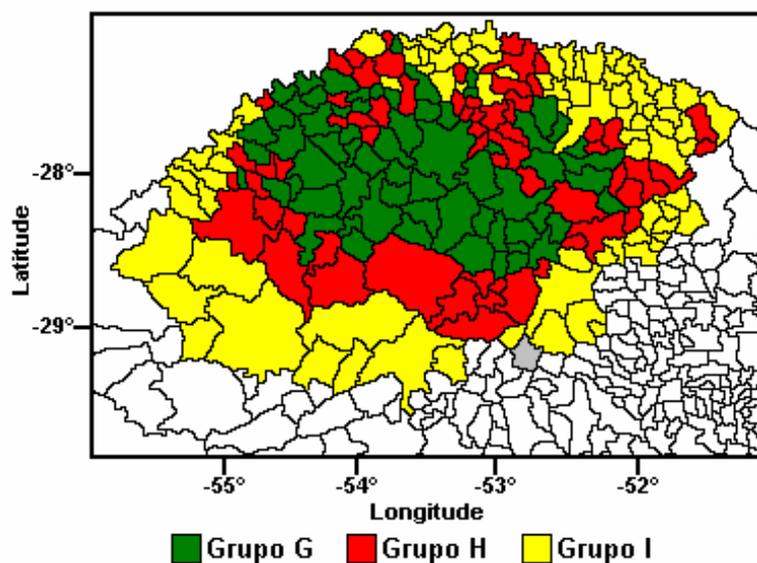


FIGURA 6. Municípios da região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul agrupados, pelo método de Ward, considerando a **razão entre a área colhida de soja e a área total do município**. Período: 1997-2000 (Fonte de dados: IBGE).

TABELA 14. Valores médio, máximo e mínimo de **razão entre a área colhida de soja e a área total do município**, na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período 1997-2000, município que os apresentou e ano de ocorrência.

Grupo	Área relativa (%)	Município	Ano
Grupo G			
Média	58,06		
Máximo	84,64	Humaitá	2000
Mínimo	41,68	Boa Vista das Missões	1997
Grupo H			
Média	41,87		
Máximo	59,04	Nova Candelária	1997 e 1998
Mínimo	13,89	Lajeado do Bugre	1997
Grupo I			
Média	16,06		
Máximo	41,18	Palmitinho	1997

Mínimo	0,04	Mariano Moro	2000
--------	------	--------------	------

Nas Tabelas 15, 16 e 17 são apresentados os municípios que pertencem a cada grupo definido nesta análise de agrupamento.

TABELA 15. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “G” (maior razão entre área colhida de soja e a área do município).

Ajuricaba	Coronel Bicaco	Ipiranga do Sul	Santa Bárbara do Sul
Alegria	Coxilha	Jacutinga	Santa Rosa
Augusto Pestana	Crissiumal	Lagoa dos Três Cantos	Santo Ângelo
Barra Funda	Dois Irmãos das Missões	Mato Castelhano	Santo Antônio do Planalto
Boa Vista das Missões	Doutor Maurício Cardoso	Não-Me-Toque	Santo Augusto
Boa Vista do Buricá	Entre-Ijuís	Nova Ramada	Santo Cristo
Bom Progresso	Ernestina	Novo Machado	Sede Nova
Braga	Erval Seco	Novo Tiradentes	Selbach
Campinas do Sul	Giruí	Palmeira das Missões	Sertão
Cândido Godói	Guarani das Missões	Panambi	Sete de Setembro
Carazinho	Horizontina	Pejuçara	Tapera
Catuípe	Humaitá	Pontão	Três de Maio
Chapada	Ibirubá	Rodeio Bonito	Tucunduva
Chiapeta	Ijuí	Ronda Alta	Tuparendi
Colorado	Independência	Saldanha Marinho	Victor Graeff
Condor	Inhacorá	Salvador das Missões	Vista Gaúcha
Coronel Barros			

TABELA 16. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “H” (média razão entre área colhida de soja e a área total do município).

Água Santa	Esperança do Sul	Nova Boa Vista	São Miguel das Missões
Alto Alegre	Espumoso	Nova Candelária	São Pedro do Butiá
Barra do Guarita	Estação	Novo Barreiro	São Valério do Sul
Caibaté	Eugênio de Castro	Passo Fundo	Sarandi
Campina das Missões	Faxinalzinho	Porto Mauá	Senador Salgado Filho
Campo Novo	Fortaleza dos Valos	Quinze de Novembro	Tapejara

Continuação TABELA 16. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “H” (média razão entre área colhida de soja e a área total do município).

Campos Borges	Gentil	Redentora	Tenente Portela
Cerro Grande	Getúlio Vargas	Rio dos Índios	Tiradentes do Sul
Cerro Largo	Ibiaçá	Rondinha	Três Palmeiras
Constantina	Jaboticaba	Sagrada Família	Três Passos
Coqueiros do Sul	Jóia	Salto do Jacuí	Trindade do Sul
Cristal do Sul	Lajeado do Bugre	São José das Missões	Tupanci do Sul
Cruz Alta	Marau	São José do Inhacorá	Ubiretama
Engenho Velho	Mormaço	São José do Ouro	Vila Lângaro
Entre Rios do Sul	Nicolau Verqueiro	São Luiz Gonzaga	Vitória das Missões
Erebango	Nonoai	São Martinho	

TABELA 17. Municípios do Rio Grande do Sul pertencentes ao grupo “I” (menor razão entre a área colhida de soja e a área total do município).

Alecrim	Derrubadas	Maximiliano de Almeida	Santo Expedito do Sul
Alpestre	Dezesseis de Novembro	Miraguaí	São Domingos do Sul
Ametista do Sul	Erechim	Muliterno	São João da Urtiga

Aratiba	Erval Grande	Paim Filho	São José do Herval
Aurea	Floriano Peixoto	Palmitinho	São Nicolau
Barão de Cotegipe	Fontoura Xavier	Pinhal	São Paulo das Missões
Barra do Rio Azul	Frederico Westphalen	Pinhal Grande	São Valentim
Barracão	Gaurama	Pinheirinho do Vale	Seberi
Barros Cassal	Gramado dos Loureiros	Pirapó	Severiano de Almeida
Benjamin Constant do Sul	Ibiraiaras	Planalto	Soledade
Bossoroca	Ibirapuitã	Ponte Preta	Taquaruçu do Sul
Cacique Doble	Iraí	Porto Lucena	Três Arroios
Caçara	Itacurubi	Porto Vera Cruz	Tunas
Camargo	Itatiba do Sul	Porto Xavier	Tupanciretã
Carlos Gomes	Jari	Quevedos	Unistalda
Casca	Júlio de Castilhos	Roque González	Vanini
Caseiros	Liberato Salzano	Sananduva	Viadutos
Centenário	Machadinho	Santiago	Vicente Dutra
Charrua	Marcelino Ramos	Santo Antônio das Missões	Vila Maria
Ciriaco	Mariano Moro	Santo Antônio do Palma	Vista Alegre
David Canabarro			

4.1.1.4 Considerações sobre os grupos

Ao ser feita uma análise sobre os resultados dos agrupamentos das três variáveis conjuntamente, é possível observar a existência de uma relação entre eles. Alguns municípios que apresentam altos rendimentos e alto percentual de área colhida de soja também estão incluídos no agrupamento de municípios de maior produção. Diversas combinações como esta podem ser feitas e observa-se que a posição de um município em determinado grupo de determinada variável depende ou define sua colocação em outro grupo de outra variável.

A seguir, serão apresentados os resultados de algumas análises realizadas para os grupos gerados a partir do agrupamento realizado com base nos rendimentos médios observados (grupos “A”, “B” e “C”).

A análise do comportamento dos rendimentos e dos valores de NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) foi realizada no período de 1982 a 2000. Anos anteriores a esta série não foram utilizados nestas análises por não existir a disponibilidade de imagens de satélite.

a) quanto ao rendimento

Os valores de rendimentos médios dos grupos não apresentaram alternância ao longo da série analisada. No grupo “A” foram verificados sempre os maiores rendimentos ao longo de toda a série estudada, tendo os grupos “B” e “C” apresentado valores intermediários e menores, respectivamente (Figura 7). A única exceção foi o ano de 1987, em que no grupo “B” foram verificados rendimentos médios maiores do que no grupo “A”, embora a diferença entre os rendimentos médios dos dois grupos tenha sido de apenas 41kg/ha.

Analisando a série de dados de 1982 a 2000, verifica-se que os rendimentos da cultura da soja flutuam ao longo dos anos nos três grupos, indicando que a utilização de tecnologia na agricultura nem sempre evita perdas na produção. A ocorrência de estiagens nos anos de 1982, 1986, 1988, 1991 e 1999, contribuíram para a redução dos rendimentos na região de estudo como um todo. Em 1991, dada a ocorrência de estiagem de abrangência regional, foi observada a maior redução nos rendimentos ao longo da série estudada, atingindo igualmente os três grupos, que apresentaram valores de rendimento muito próximos entre si. Isto demonstra que a estiagem é um fenômeno de grande escala que tem muita influência na variabilidade interanual dos rendimentos no Rio Grande do Sul, conforme foi demonstrado por Bergamaschi (1989) e por Berlatto & Fontana (1999). No ano de 2000, a ocorrência de estiagem mais localizada na porção oeste da região de estudo ocasionou as maiores diferenças entre os rendimentos médios dos três grupos.

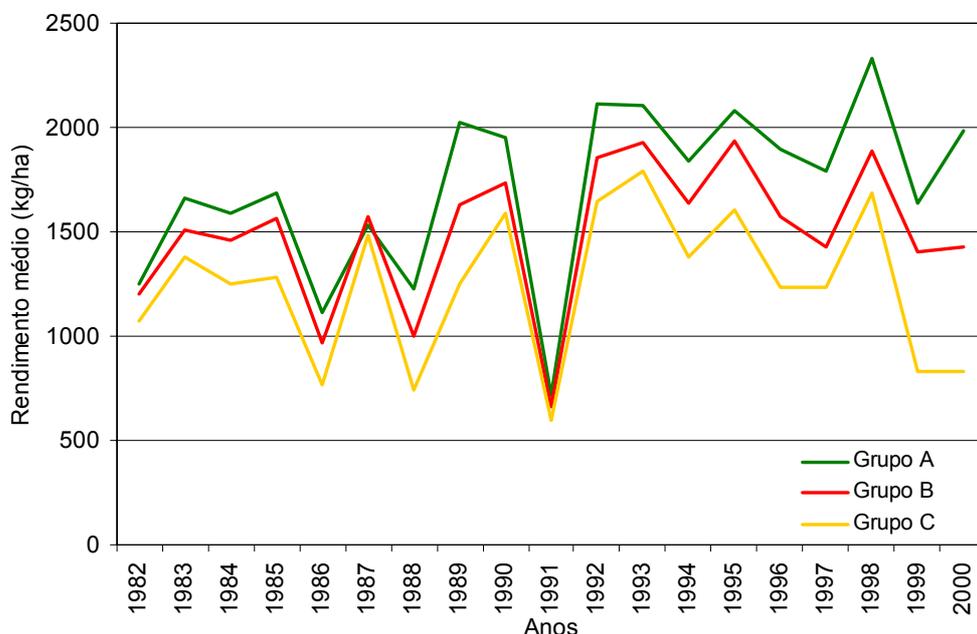


FIGURA 7. Rendimentos médios da soja na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul nos grupos de alto (A), médio (B) e baixo (C) níveis de rendimento. Período 1982 a 2000.

b) quanto ao índice de vegetação

A Figura 8 mostra o comportamento dos valores de NDVI da soja ao longo do período de permanência da cultura no campo. No grupo "A", de maiores rendimentos, o comportamento da curva foi o esperado, apresentando valores menores de NDVI no início e no final do ciclo, e tendo como máximo o mês de fevereiro, época em que a cultura, em média, encontra-se no período reprodutivo.

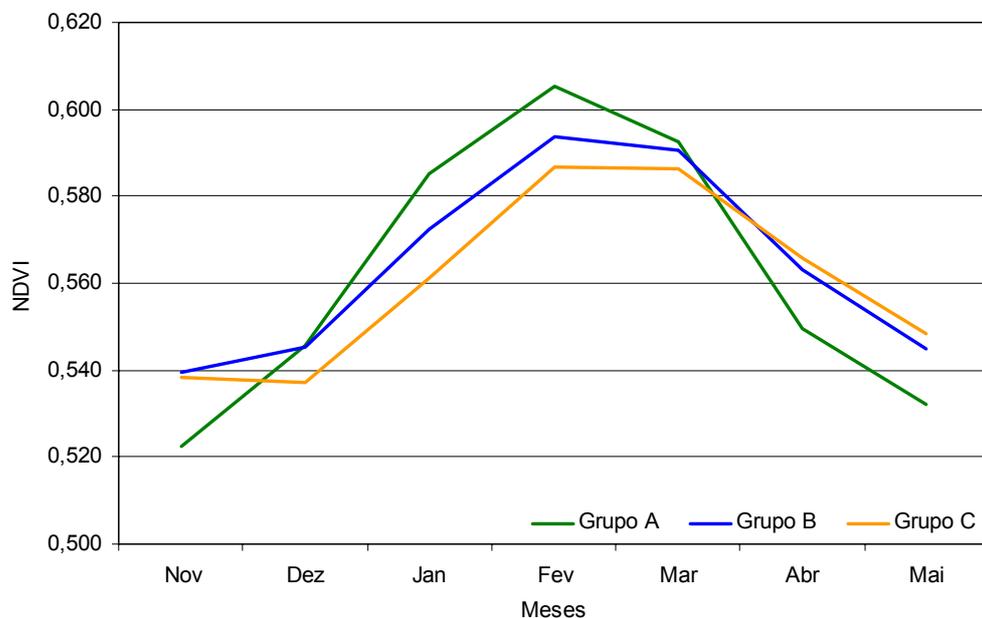


FIGURA 8. Variação do máximo NDVI médio dos grupos de alto (A), médio (B) e baixo (C) rendimento, na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul. Período: 1982 a 2000.

Os resultados obtidos quanto ao comportamento do índice de vegetação ao longo do ciclo da cultura foram semelhantes aos encontrados por Fontana (1995), Fontana et al. (1999) e Motta et al. (2002). Os autores observaram que as oscilações dos índices de vegetação acompanham as oscilações da densidade de biomassa presente na superfície.

O comportamento do NDVI nos outros dois grupos (“B” e “C”) foi semelhante, sendo porém a amplitude de variação menor. Nestes grupos, o NDVI foi maior no início e no final do ciclo em relação ao grupo “A”. Esta inversão provavelmente ocorreu devido à maior quantidade de solo descoberto no início do ciclo (semeadura e início da emergência das plântulas) e a menor densidade de cobertura vegetal no final do ciclo (senescência e colheita) no grupo “A”. Outra hipótese é de que nos outros grupos exista uma maior diversidade vegetal, seja de espécies de importância agrícola ou não, o que contribuiria para uma menor redução do índice de vegetação nestes dois períodos.

4.1.2 Imagens digitais de rendimentos

A Figura 9 apresenta as imagens que foram criadas, em formato digital, a partir da recuperação regressiva das áreas dos municípios da região de estudo. Observa-se a grande variabilidade temporal e espacial dos rendimentos da soja nesta região. Os anos de menores rendimentos foram as safras de 1982, 1986,

1988, 1991 e 1999. Estes foram anos em que ocorreram estiagens no Rio Grande do Sul, sendo a diminuição do rendimento observada em toda a região estudada, indicando que grandes estiagens determinam impactos regionais. Nas demais safras, verificaram-se variações importantes nos rendimentos da região de estudo. O maior rendimento foi de 3.044kg/ha, ocorrido em 1992 no município de Colorado, enquanto que o menor rendimento foi de 181kg/ha, ocorrido no município de Iraí em 1983.

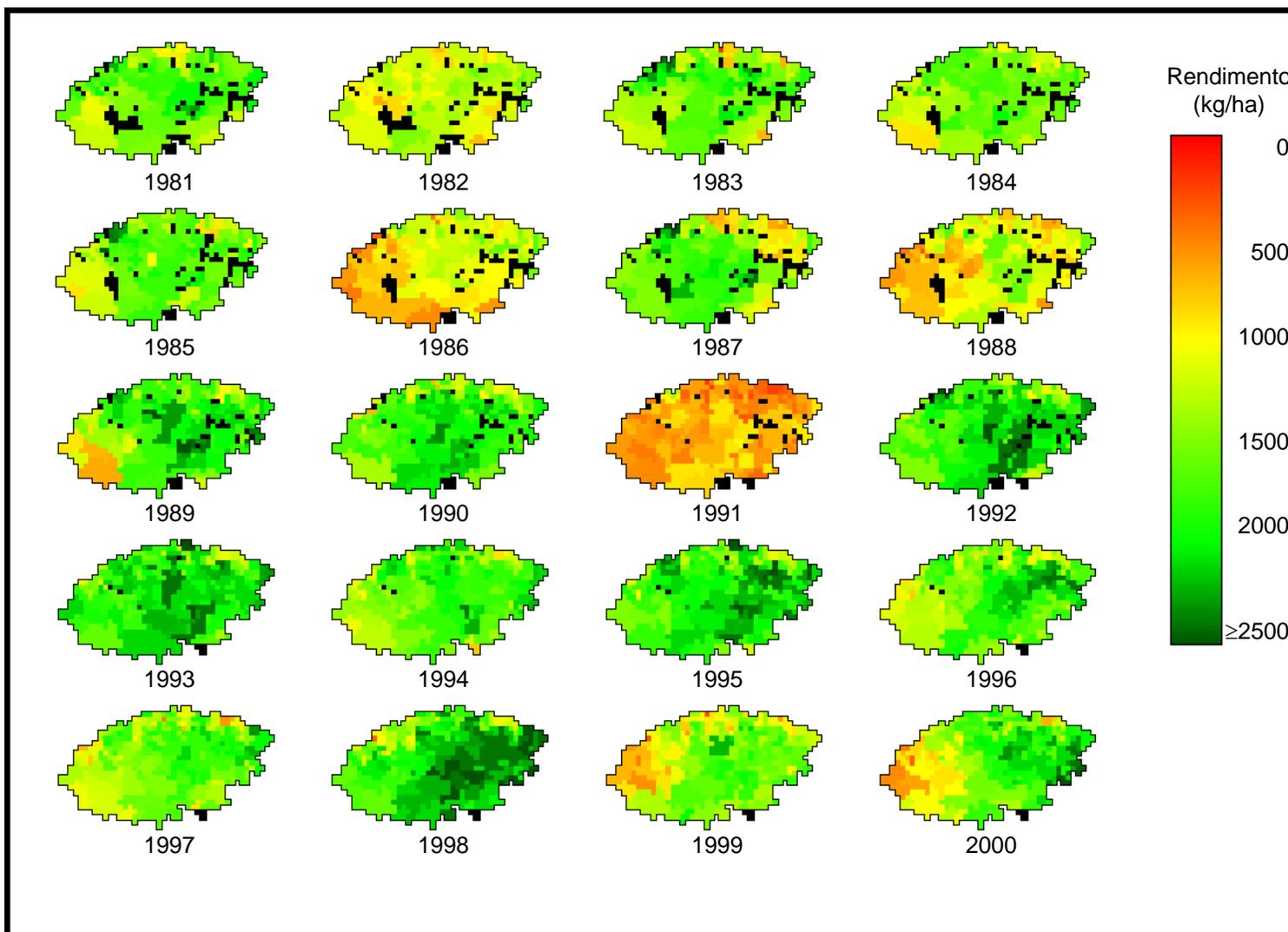


FIGURA 9. Rendimentos observados (kg/ha) na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul, no período de 1981 a 2000. Os *pixels* em preto representam ausência de dados. Fonte de dados: IBGE.

4.2 Estimativa de rendimento

O modelo de estimativa dos rendimentos para a cultura da soja é composto por dois termos: o termo agrometeorológico e o termo espectral, os quais serão analisados a seguir.

4.2.1 Termo agrometeorológico

4.2.1.1 Rendimento relativo

Os valores calculados do rendimento relativo para os anos da série estudada são apresentados na Tabela 18.

TABELA 18. Valores do rendimento relativo da soja no Estado do Rio Grande do Sul. Período: 1975 a 2000.

Anos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1970						0,757	0,787	0,811	0,606	0,407
1980	0,724	0,793	0,569*	0,786	0,743	0,779*	0,499	0,791	0,538	0,879
1990	0,874*	0,325*	0,954	0,958	0,831	0,953	0,816	0,775*	1,000	0,699
2000	0,787									

* Anos pertencentes ao período de validação do modelo

O máximo rendimento de soja na série estudada ocorreu em 1998 (2.088kg/ha). Nos demais anos os rendimentos de soja foram menores devido à ocorrência de alguns fatores que restringiram os rendimentos de soja na região. No ano de 1991 o rendimento relativo foi de 0,325, isto é, a soja apresentou apenas 32,5% do rendimento máximo da série, sendo equivalente a 680kg/ha. A ocorrência de uma grande estiagem naquele ano foi responsável por uma das maiores quebras de safras no Estado, sendo que as perdas da produção agrícola (soja e milho) do Rio Grande do Sul chegaram a 5,5 milhões de toneladas (EMATER, 2002).

4.2.1.2 Evapotranspiração relativa

Os meses que apresentaram os maiores coeficientes de correlação entre a evapotranspiração relativa (ETr/ETo) e os rendimentos da soja observados foram janeiro, fevereiro e março, com valores de 0,736, 0,514 e 0,609 respectivamente (Figura 10). Estes meses coincidem com o período de florescimento e enchimento de grãos da cultura da soja, considerados críticos quanto à deficiência hídrica.

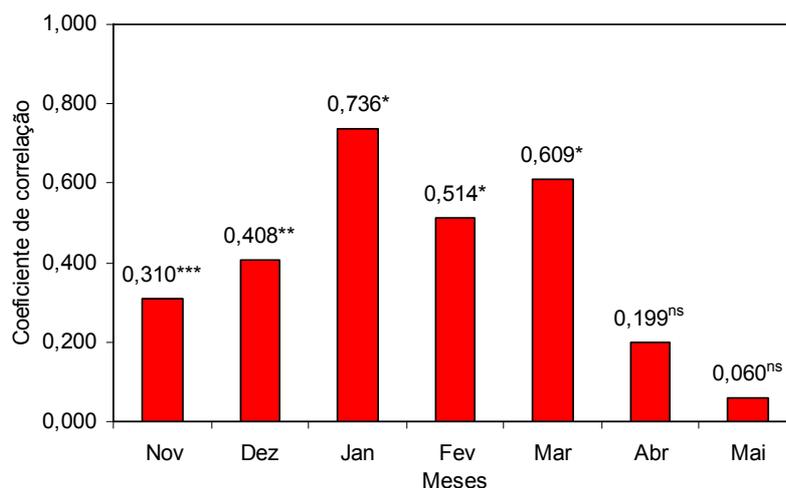


FIGURA 10. Coeficientes de correlação entre a evapotranspiração relativa (ETr/ETo) e os rendimentos médios da soja na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul. Período: 1975 a 2000. Coeficientes significativos a 1% (*), 5%(**), 10%(***) e não significativos(ns).

Os valores calculados de ETr/ETo para os meses de janeiro (Tabela 19), fevereiro (Tabela 20) e março (Tabela 21) demonstram a alta variabilidade interanual da disponibilidade hídrica no Rio Grande do Sul. Os valores de ETr/ETo, ao longo da série estudada, variaram entre 0,178 (janeiro de 1979) e 0,995 (março de 1992). O ano de 1998, que apresentou o maior rendimento da

série estudada (2.088kg/ha), foi o único em que se verificaram valores de ETr/ETo superiores a 0,95 nos três meses.

TABELA 19. Valores de evapotranspiração relativa (ETr/ETo) para a soja no mês de **janeiro**, na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul.

Anos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1970						0,919	0,940	0,908	0,591	0,178
1980	0,626	0,848	0,308*	0,772	0,951	0,374*	0,592	0,857	0,729	0,928
1990	0,888*	0,473*	0,747	0,986	0,599	0,863	0,835	0,841*	0,951	0,627
2000	0,761									

* Anos pertencentes ao período de validação do modelo

TABELA 20. Valores de evapotranspiração relativa (ETr/ETo) para a soja no mês de **fevereiro**, na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul.

Anos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1970						0,880	0,854	0,863	0,452	0,694
1980	0,446	0,896	0,887*	0,887	0,881	0,916*	0,737	0,899	0,684	0,763
1990	0,800*	0,421*	0,974	0,778	0,992	0,807	0,949	0,940*	0,968	0,902
2000	0,749									

* Anos pertencentes ao período de validação do modelo

TABELA 21. Valores de evapotranspiração relativa (ETr/ETo) para a soja no mês de **março**, na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul.

Anos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1970						0,962	0,912	0,759	0,578	0,724
1980	0,926	0,629	0,615*	0,851	0,786	0,874*	0,840	0,689	0,483	0,905
1990	0,905*	0,511*	0,995	0,948	0,830	0,833	0,861	0,662*	0,965	0,674
2000	0,858									

* Anos pertencentes ao período de validação do modelo

Matzenauer et al. (2002) definiram um índice para classificação de regiões em termos de risco por deficiência hídrica para a produção de grãos de soja considerando o consumo relativo de água (ETr/ETm). Os autores definiram que regiões com baixo risco são as que apresentam ETr/ETm maior do que 0,6, durante o período crítico; regiões com risco médio são as que apresentam ETr/ETm menor ou igual a 0,6 e maior ou igual a 0,4, durante o período crítico; e

regiões com alto risco são as que apresentam E_{Tr}/E_{Tm} menor do que 0,4, durante o período crítico.

No presente trabalho, foi utilizada a razão E_{Tr}/E_{To} média dos meses de janeiro, fevereiro e março de cada ano, ao invés da razão E_{Tr}/E_{Tm} do período crítico da cultura da soja ao déficit hídrico, utilizada por Matzenauer et al. (2002), sendo, portanto, necessário considerar novos limites para as regiões de alto, médio e baixo risco por deficiência hídrica. Foram considerados como sendo de alto e baixo risco valores de E_{Tr}/E_{To} menores do que 0,6 e maiores do que 0,8, respectivamente, e de médio risco valores maiores ou iguais a 0,6 e menores ou iguais a 0,8. A Figura 11 apresenta a dispersão dos rendimentos relativos em função da média das disponibilidades relativas de água dos meses de janeiro, fevereiro e março na região de estudo.

Observa-se que, dos 26 anos da série estudada, a região de estudo apresentou alto risco por deficiência hídrica em apenas três anos. Apresentou quinze anos com baixo risco e os oito anos restantes apresentaram médio risco. Nota-se, também, que os anos que apresentaram alto e médio risco para a produção de grãos coincidem com aqueles que apresentaram menores rendimentos relativos. Matzenauer et al. (2002) analisaram 654 casos, sendo que em 142 o índice E_{Tr}/E_{Tm} foi menor ou igual que 0,40 durante o período crítico, ou seja, 21,7% dos casos. Neste estudo, somente 11,5% dos casos apresentaram E_{Tr}/E_{To} menor do que 0,60 (três casos em 26), representando alto risco. É necessário ressaltar que neste estudo foi utilizada a evapotranspiração relativa (E_{Tr}/E_{To}) média de três meses de uma grande região, o que tende a suavizar tendências.

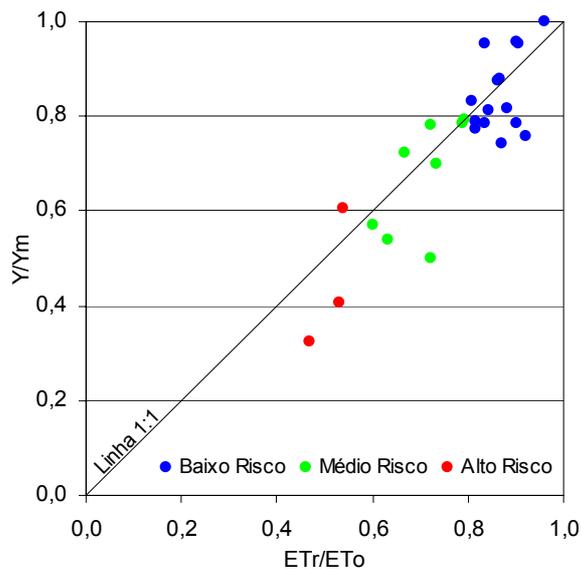


FIGURA 11. Rendimentos relativos (Y/Y_m) do Estado e evapotranspiração relativa (ET_r/ET_o) média de janeiro, fevereiro e março, na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul. Período: 1975 a 2000.

4.2.1.3 Modelo de Jensen modificado

Através da utilização dos dados de rendimento relativo e de evapotranspiração relativa, foi ajustado e validado o modelo de Jensen modificado. Neste modelo, os expoentes (λ_i) indicam o grau de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico em cada mês. Quanto maior o expoente, maior é a sensibilidade da planta ao déficit hídrico, isto é, a ocorrência de estiagem no respectivo mês pode acarretar em maior redução no rendimento final. Observa-se no modelo ajustado (Tabela 22) que o mês de março apresentou o maior expoente (0,475), coincidindo com o subperíodo de enchimento de grãos, dependendo da época de semeadura. Berlato (1987), Berlato & Fontana (1999) e

Fontana et al. (2001b) também concluíram que o mês de março é o de maior importância na definição dos rendimentos desta cultura no Rio Grande do Sul.

TABELA 22. Estatísticas dos expoentes estimados para o modelo de Jensen modificado para a estimativa do rendimento da soja no Rio Grande do Sul. Período: 1975 a 2000.

Mês	Expoente (λ)	Probabilidade (p)
Janeiro	0,401	0,0001
Fevereiro	0,192	0,1536
Março	0,475	0,0025

O coeficiente de determinação (R^2) obtido no período de ajuste do modelo de Jensen modificado foi de 0,73, indicando que a disponibilidade hídrica é o fator que mais interfere na definição dos rendimentos da cultura da soja no Rio Grande do Sul, conforme apontado por Cunha & Bergamaschi (1992) e Berlato & Fontana (1999).

Fontana et al. (2001b) encontraram um coeficiente de determinação muito próximo (0,76) ao encontrado neste trabalho, o que é esperado, visto que parte da série de dados utilizada é comum aos dois trabalhos. Já Berlato (1987) obteve coeficientes superiores, porém estes foram obtidos em condições de parcelas experimentais.

Na validação do modelo foi verificado um coeficiente de correlação de 0,88. Chama a atenção o baixo valor do expoente de fevereiro (0,192), o qual é de difícil compreensão no contexto da fenologia e dos períodos críticos das plantas.

As Figuras 12 e 13 mostram o desempenho do modelo de Jensen modificado no período de ajuste e no período de validação, respectivamente. Observa-se que os pontos estiveram próximos à linha 1:1 em ambos os períodos.

Na Figura 14 são apresentadas as imagens digitais do resultado da aplicação do modelo de Jensen modificado na região de estudo. Observa-se que os rendimentos estimados, em todos os *pixels*, ficaram abaixo de 2.500 kg/ha. Os rendimentos estimados seguem a distribuição espacial da disponibilidade hídrica ao longo da série estudada, a qual apresenta certa regularidade.

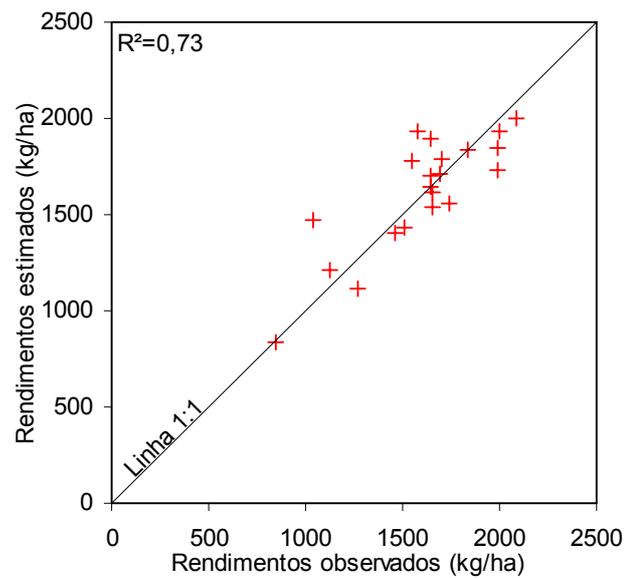


FIGURA 12. Rendimentos de soja estimados pelo modelo de Jensen modificado em função dos rendimentos observados, considerando os anos de **ajuste**. Período básico: 1975-2000.

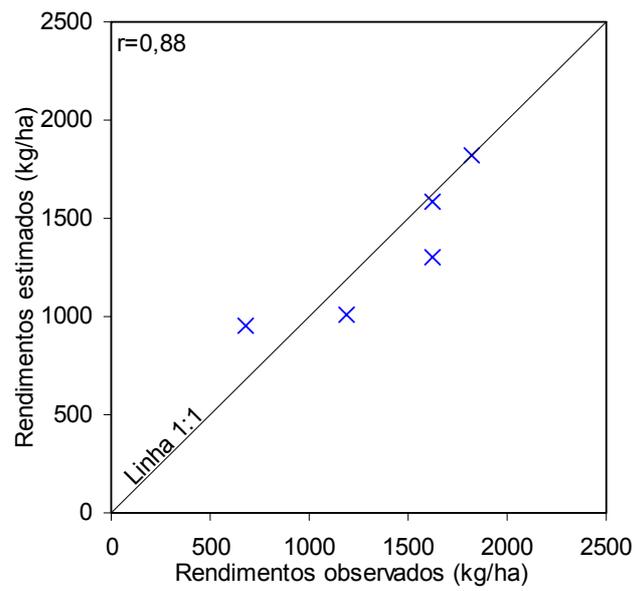


FIGURA 13. Rendimentos de soja estimados pelo modelo de Jensen modificado em função dos rendimentos observados, considerando os anos de **validação** (1982,1985,1990,1991 e 1997).

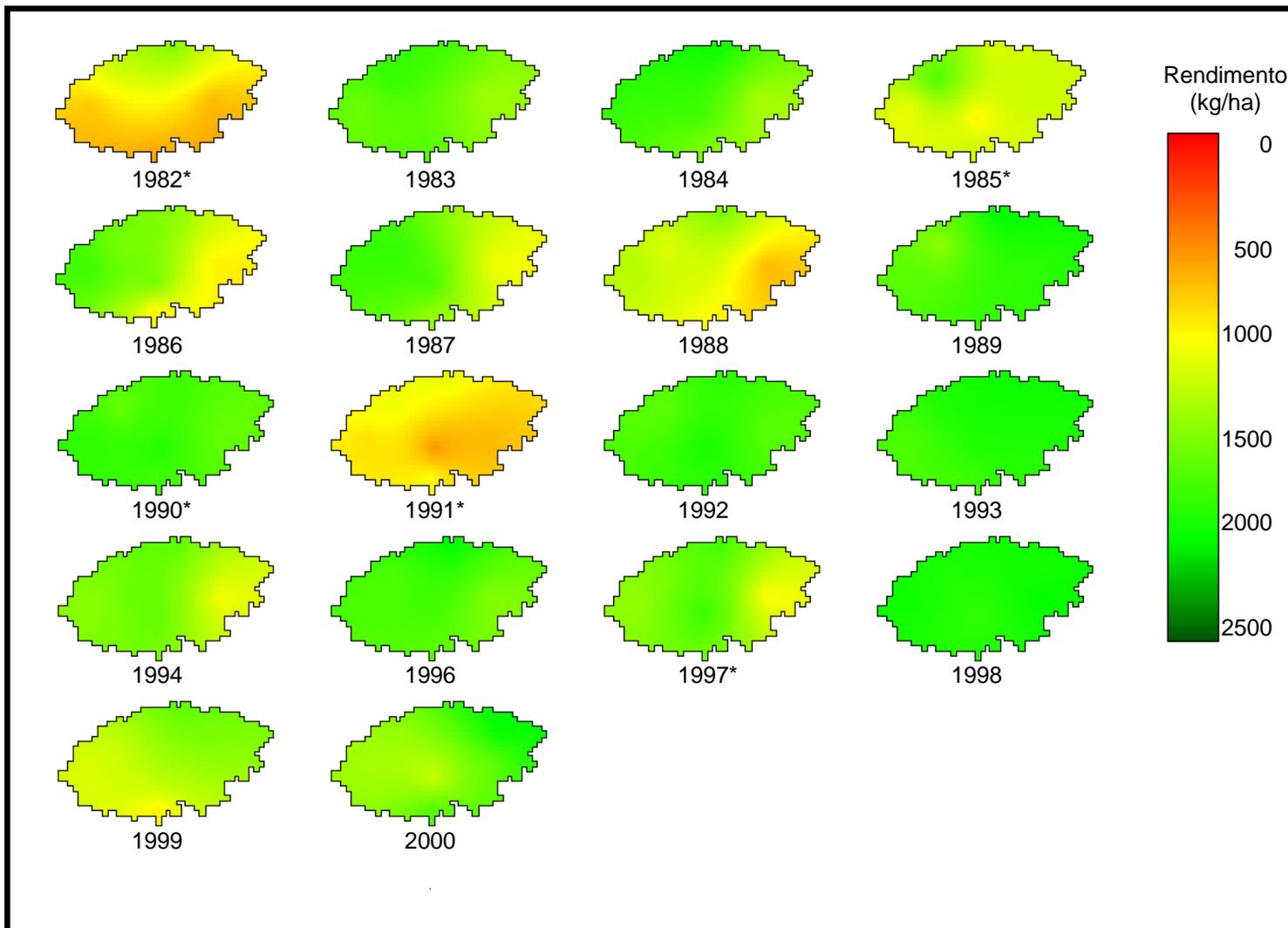


FIGURA 14. Rendimentos de soja (kg/ha) estimados pelo modelo de Jensen modificado na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período de 1982 a 2000 (*anos do período de validação).

4.2.1.4 Fator de correção

A última etapa para a obtenção das estimativas do rendimento através do termo agrometeorológico foi a aplicação do fator de correção às estimativas geradas pelo modelo de Jensen modificado.

Como o modelo de Jensen modificado foi ajustado sobre um único valor de rendimento médio para toda a região de estudo, a sua aplicação gera regiões de super e subestimativas de rendimento, quando os resultados obtidos são comparados aos rendimentos observados. A alternativa escolhida para minimizar os desvios das estimativas foi a aplicação de um fator de correção às imagens de estimativa do rendimento, obtidas através do modelo de Jensen modificado.

A Figura 15 apresenta a espacialização dos valores do fator de correção dentro da região de estudo. Em tons de vermelho e amarelo estão representadas as regiões em que o modelo de Jensen modificado gera as superestimativas de rendimento, sendo que, após a aplicação do fator de correção, o rendimento estimado é reduzido. Nas regiões de coloração verde, o modelo de Jensen modificado gera subestimativas, sendo que o rendimento estimado nestas, após a aplicação do fator de correção, é aumentado.

4.2.1.5 Estimativas obtidas pelo termo agrometeorológico

Na Figura 16 são apresentadas as imagens de estimativa do rendimento através do termo agrometeorológico. Após ser aplicado o fator de correção, a alta variabilidade espacial dos rendimentos dentro da região de estudo é evidenciada. Os rendimentos estimados passam agora a ultrapassar, em alguns

pixels, o patamar dos 2.500 kg/ha, aproximando-se dos rendimentos observados (Figura 9).

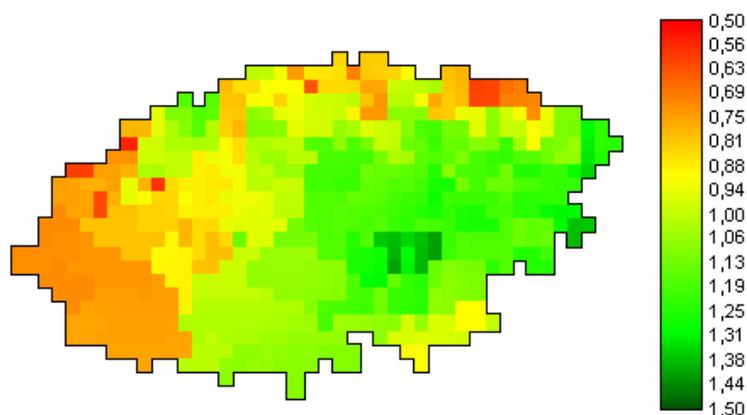


FIGURA 15. Valores do fator de correção do modelo de Jensen modificado para a região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul.

Os valores médios do termo agrometeorológico na região de estudo (rendimentos em kg/ha) extraídos destas imagens são apresentados na Tabela 23. O valor do termo agrometeorológico para o ano de 1995 não foi calculado devido à indisponibilidade de imagens de satélite.

TABELA 23. Valores do termo agrometeorológico (kg/ha) do modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja no Rio Grande do Sul.

Anos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1980			937*	1.594	1.656	1.221*	1.327	1.467	1.093	1.780
1990	1.726*	870*	1.758	1.866	1.427		1.688	1.459*	1.913	1.337
2000	1.567									

* Anos pertencentes ao período de validação do modelo

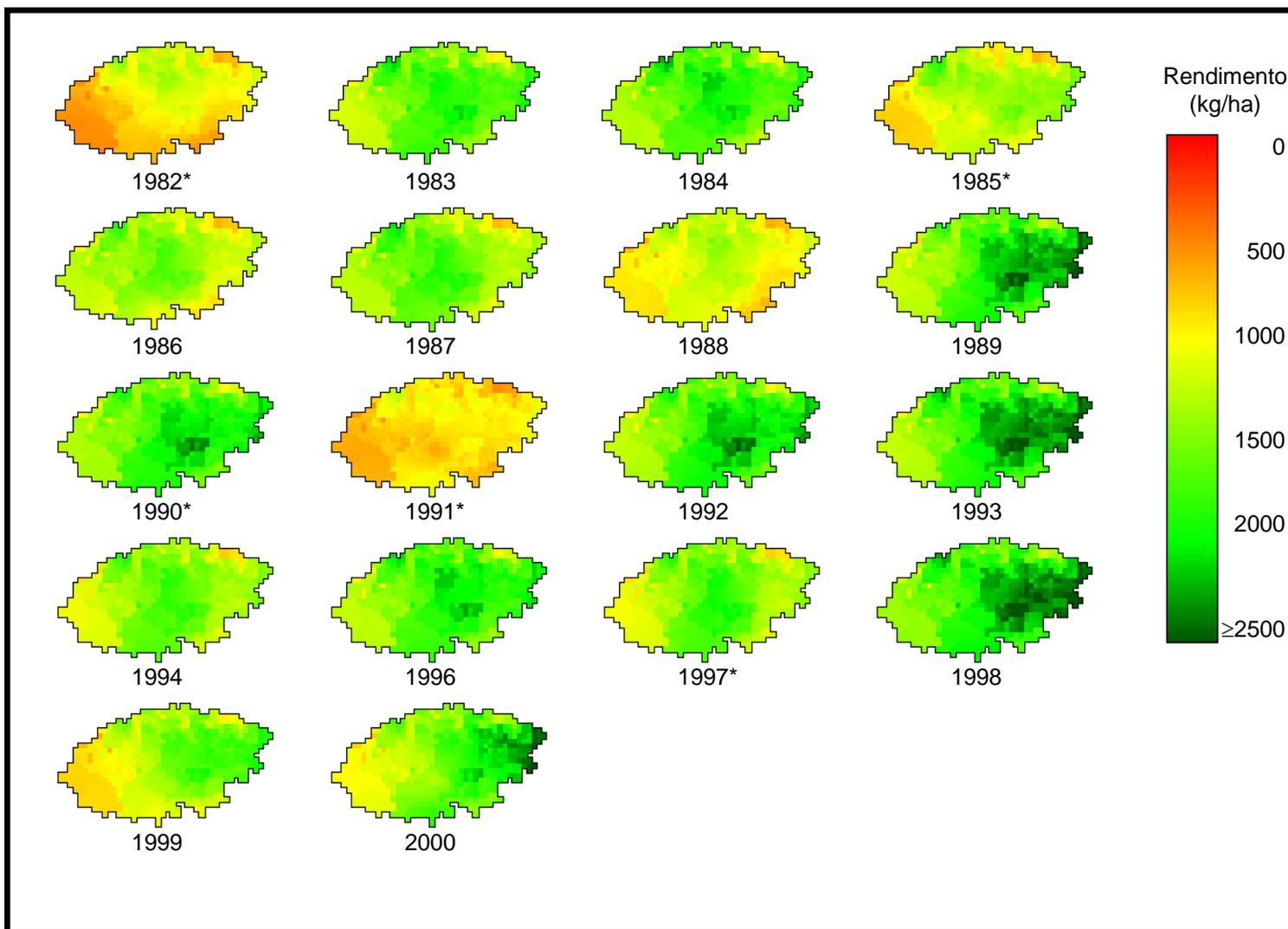


FIGURA 16. Rendimentos de soja (kg/ha) estimados pelo termo agrometeorológico na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período de 1982 a 2000 (*anos do período de validação).

4.2.2 Termo espectral

A introdução do termo espectral, obtido através de imagens do sensor AVHRR/NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanographic and Atmospheric Administration*), ao modelo de estimativa de rendimento, tem por objetivo expressar a influência de outros fatores (solos, manejo, pragas e moléstias, etc.), além da disponibilidade hídrica, nas estimativas do rendimento da cultura da soja. Justice et al. (1985), Batista et al. (1993) e, mais recentemente, Motta et al. (2002), constataram que o uso de imagens de NDVI se constitui em uma ferramenta adequada para o monitoramento do desenvolvimento da cobertura vegetal. Fontana et al. (1999), testando algumas metodologias em monitoramento e previsão de safras no Estado do Rio Grande do Sul, observaram que a evolução dos valores de NDVI ao longo do tempo pode ser relacionada à densidade de biomassa vegetal existente na superfície.

A Figura 17 apresenta a evolução temporal média dos valores de NDVI ao longo da série estudada e a Figura 18 apresenta o calendário agrícola médio da soja no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1986 a 2000. Observa-se que os valores máximos de NDVI, que ocorrem em fevereiro e março, coincidem com o período em que a cultura encontra-se em floração e no início do enchimento de grãos, apresentando a máxima densidade de biomassa no ciclo. Resultados semelhantes foram encontrados por Motta et al. (2002), que monitoraram o desenvolvimento da soja na região noroeste do Estado.

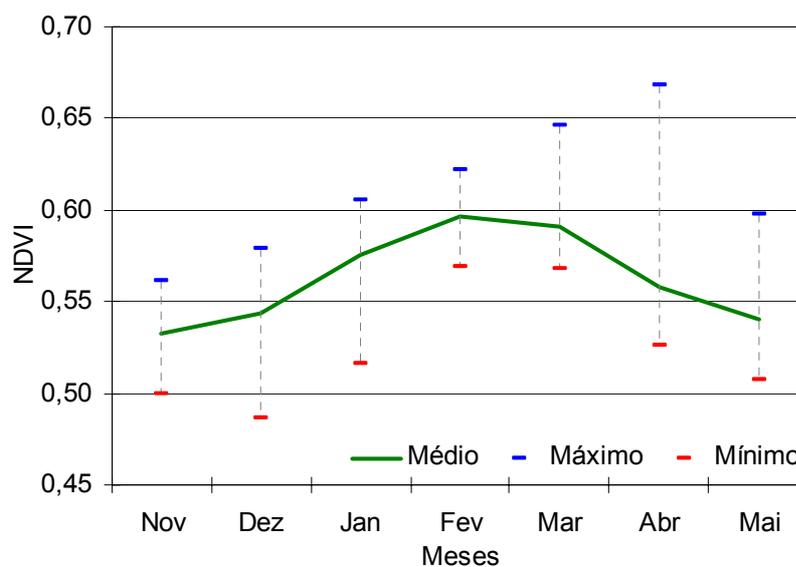


FIGURA 17. Evolução temporal do NDVI (valores mínimo, médio e máximo) na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul. Período: 1982 a 2000.

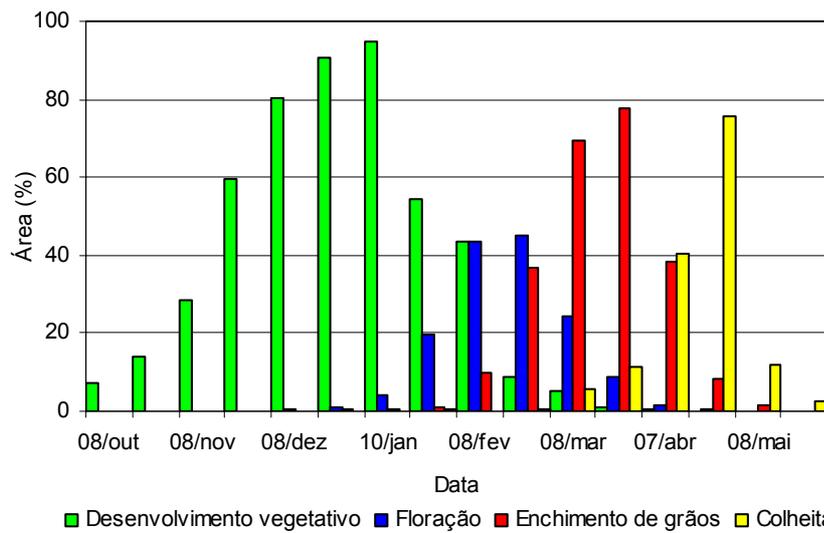


FIGURA 18. Calendário agrícola médio da cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. Período 1986 a 2000. Fonte de dados: EMATER.

Os meses em que os valores de NDVI apresentaram maiores correlações com os rendimentos observados foram dezembro e janeiro, sendo os valores destas correlações de 0,424 e 0,517 respectivamente, como é mostrado na Figura 19. Este período coincide, em média, com o início da floração da cultura no Estado. Fontana (1995) relacionando rendimentos da soja e GVI (Índice de Vegetação Global) no Rio Grande do Sul, verificaram uma correlação próxima a 0,77 para estes mesmos meses. Os autores trabalharam, entretanto, com somente 4 anos agrícolas.

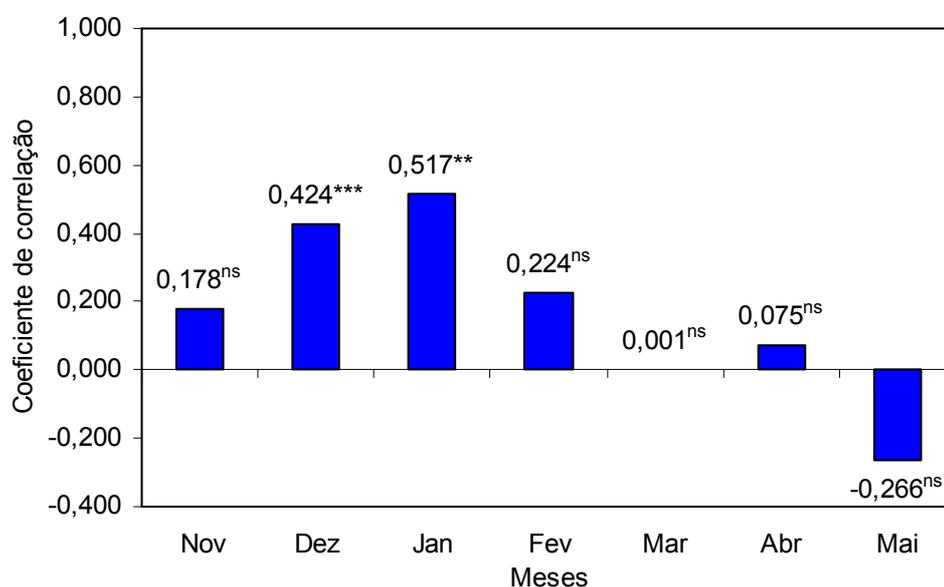


FIGURA 19. Coeficientes de correlação entre os valores de índice de vegetação (NDVI) e os rendimentos médios da soja na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul. Período: 1982 a 2000. Coeficientes significativos a 5%(**), 10%(***) e não significativos(ns).

Os meses de fevereiro e março, conforme demonstrado anteriormente, têm grande influência na definição dos rendimentos de grãos de soja. Assim,

esperava-se que nestes meses fossem encontrados coeficientes de correlação significativos entre os valores de NDVI e os rendimentos observados. A não existência de correlação nestes meses possivelmente seja consequência da falta de sensibilidade do NDVI em representar pequenas variações na quantidade de biomassa em condições de alto índice de área foliar (IAF). Este comportamento já foi observado por outros autores (Gamon et al. 1995; Fonseca, 2000).

Nos meses de fevereiro e março, a soja no Rio Grande do Sul encontra-se no período de florescimento e enchimento de grãos, que coincide com a máxima altura e índice de área foliar da cultura (Berlato et al., 1986). Neste período, variações de biomassa, associadas a restrições ambientais, possivelmente não sejam detectadas pelo NDVI.

Na Figura 20 são apresentadas as imagens de NDVI médio dos meses de dezembro e janeiro (termo espectral). Observa-se que nos anos de 1986 e 1996 os valores do termo espectral da porção mais a oeste da região de estudo foram os menores, corroborando o zoneamento agroclimático da soja para o Estado (Figura 1), que apresenta esta região como sendo a de maior risco por deficiência hídrica. Nos demais anos da série, houve uma maior uniformidade destes valores dentro da região de estudo.

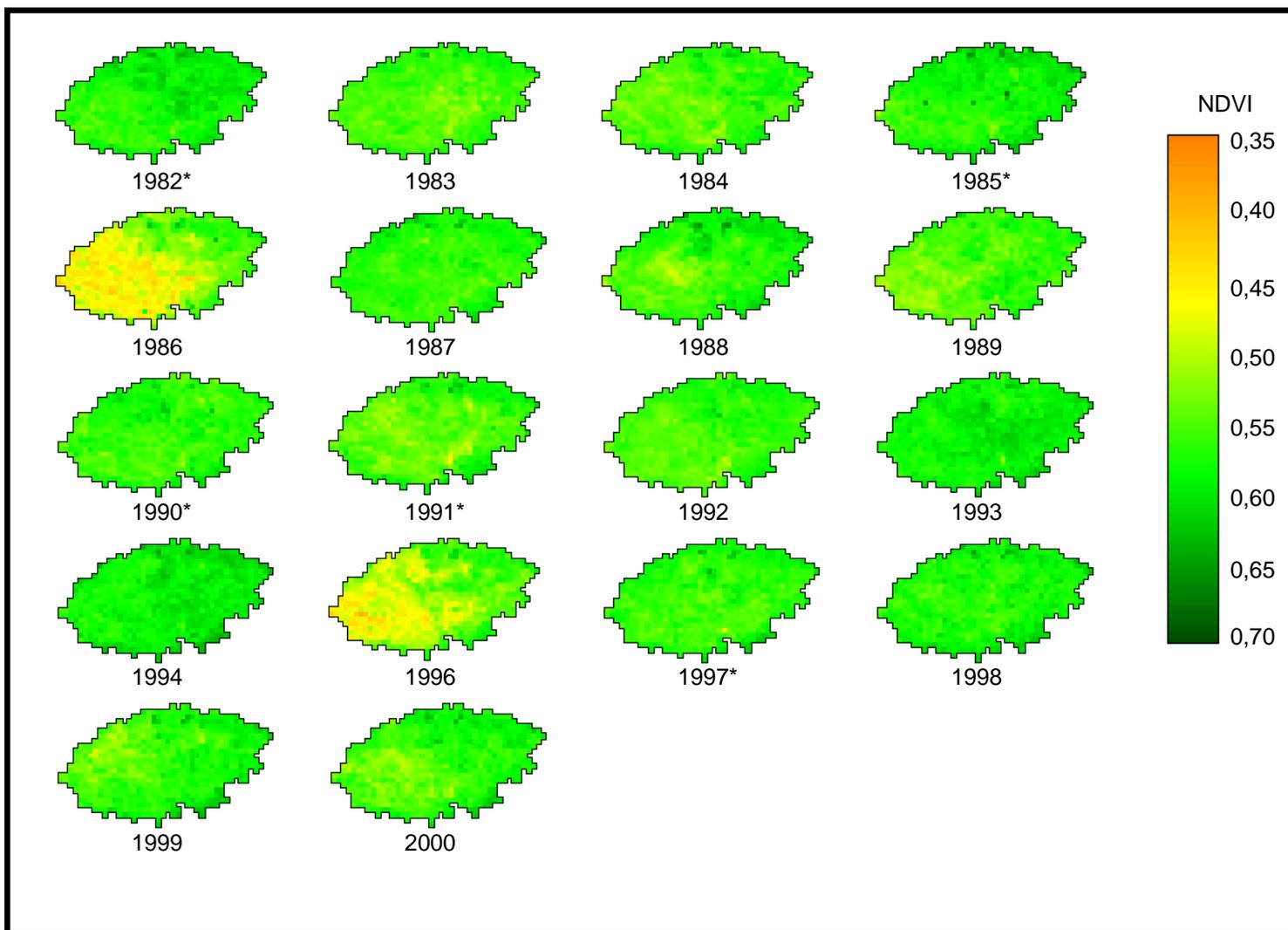


FIGURA 20. Imagens do termo espectral (NDVI médio de dezembro e janeiro) do modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja no Rio Grande do Sul. Período: 1982 a 2000 (*anos do período de validação).

Os valores encontrados para o termo espectral, utilizados no ajuste e na validação do modelo agrometeorológico-espectral, são apresentados na Tabela 24. Nota-se que não existe grande variação dos valores do termo espectral ao longo da série estudada. O menor valor foi de 0,501 em 1986 e o maior valor foi de 0,589 em 1994, ambos no período de ajuste. Salienta-se, no entanto, que estes são valores médios de toda a região de estudo, sendo que os valores do termo espectral apresentaram maior variação espacial e temporal dentro da mesma.

TABELA 24. Valores do termo espectral (NDVI médio de dezembro e janeiro) do modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja no Rio Grande do Sul.

Anos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1980			0,580*	0,553	0,553	0,579*	0,501	0,566	0,564	0,549
1990	0,565*	0,549*	0,557	0,587	0,589		0,514	0,564	0,576	0,564
2000	0,561							*		

* Anos pertencentes ao período de validação do modelo

4.2.3 Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja para o Estado do Rio Grande do Sul

A estimativa dos parâmetros do modelo agrometeorológico-espectral, obtidos através da regressão linear múltipla, são apresentados na Tabela 25. Os coeficientes de determinação (R^2) dos períodos de ajuste e de validação do modelo foram de 0,91 e 0,88, respectivamente. A incorporação do termo espectral ao modelo melhorou o desempenho das estimativas em relação ao modelo de Jensen modificado, no qual os valores dos coeficientes de determinação nos período de ajuste e validação foram 0,73 e 0,77, respectivamente.

TABELA 25. Estatísticas dos parâmetros do modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da cultura da soja no Rio Grande do Sul Período: 1982 a 2000.

Termo	Parâmetro	Probabilidade (p)
Intercepto	-2.634,87	0,002313
Agrometeorológico	1,08	0,000005
Espectral	4.634,20	0,002669

Os resultados obtidos são muito promissores quando comparados com os resultados obtidos por outros autores. Rudorff e Batista (1990b) encontraram coeficientes de determinação que variaram de 0,50 a 0,69, trabalhando com lavouras comerciais de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Fontana et al. (1998), trabalhando com soja no Rio Grande do Sul, verificaram que o modelo agrometeorológico-espectral explicou 55,2% da variação do rendimento desta cultura. Salientaram, contudo, que os resultados do trabalho eram preliminares, dado o pequeno número de anos com imagens de satélite utilizadas.

O modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja para o Rio Grande do Sul pode ser expresso pela equação:

Excluído: s

$$Y = -2.634,87 + (1,08 * TA) + (4.634,20 * TE) \quad (6)$$

onde: Y é o rendimento médio da cultura da soja estimado pelo modelo agrometeorológico-espectral (kg/ha); TA é o valor do termo agrometeorológico (kg/ha) e TE é o valor do termo espectral (NDVI).

A Figura 21 apresenta as imagens das estimativas do rendimento da soja obtidas através da aplicação do modelo agrometeorológico-espectral. Estas imagens representam bem a variabilidade interanual dos rendimentos, assim como a variabilidade espacial dos rendimentos dentro da região de estudo.

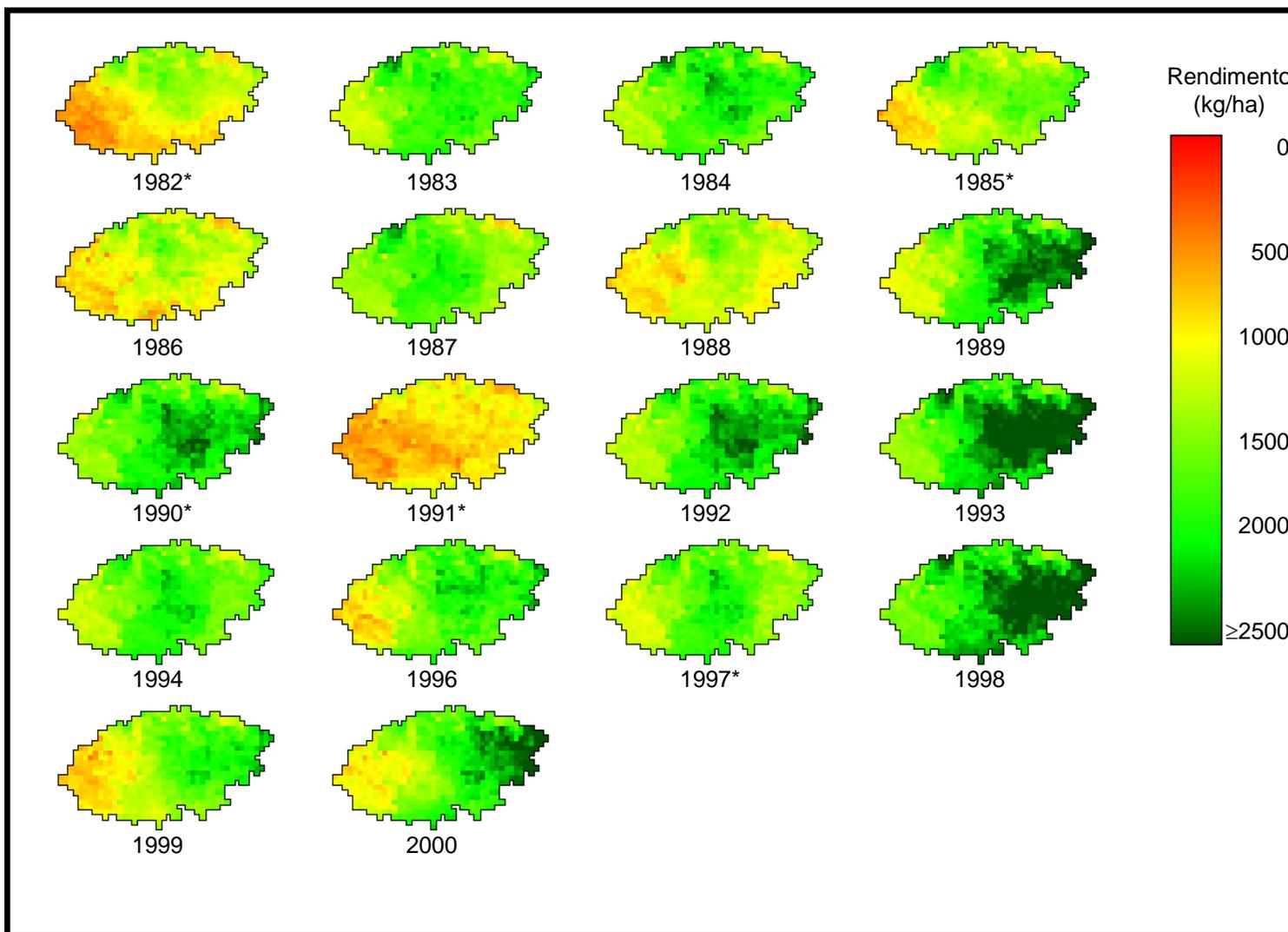


FIGURA 21. Rendimentos de soja (kg/ha) estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral na região de produção significativa desta cultura no Rio Grande do Sul, no período de 1982 a 2000 (*anos do período de validação).

Nota-se que os rendimentos estimados ultrapassaram o patamar dos 2.500 kg/ha.

Na Tabela 26 são apresentados os rendimentos médios da cultura da soja estimados através do modelo agrometeorológico-espectral na região de produção significativa de soja no Estado do Rio Grande do Sul. Os valores de rendimentos médios estimados através deste modelo apresentaram um coeficiente de correlação de 0,95, considerando-se a série completa de anos (ajuste e validação), com os rendimentos médios observados no Estado do Rio Grande do Sul.

TABELA 26. Rendimentos médios da cultura da soja, na região de produção significativa desta cultura no Estado do Rio Grande do Sul, estimados pelo Modelo Agrometeorológico-Espectral.

Anos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1980			1067*	1655	1725	1373*	1125	1581	1164	1840
1990	1853*	853*	1853	2105	1643		1577	1559*	2107	1429
2000	1664									

* Anos pertencentes ao período de validação do modelo

Salienta-se que o modelo agrometeorológico-espectral obtido tem caráter preditivo, visto que, em ambos os termos do modelo, agrometeorológico e espectral, são utilizados dados de até março. Assim, em meados de abril, cerca de um mês antes da colheita, é possível gerar a informação do rendimento estimado de soja no Rio Grande do Sul.

4.2.4 Acurácia das estimativas

As Figuras 22 e 23 mostram que o desempenho do modelo agrometeorológico-espectral foi muito bom em grande parte da faixa de variação dos valores observados de rendimento de grãos de soja, dado pela uniformidade na distribuição dos pontos em relação à linha 1:1, tanto no período de ajuste (Figura 22) como no período de validação (Figura 23) do modelo.

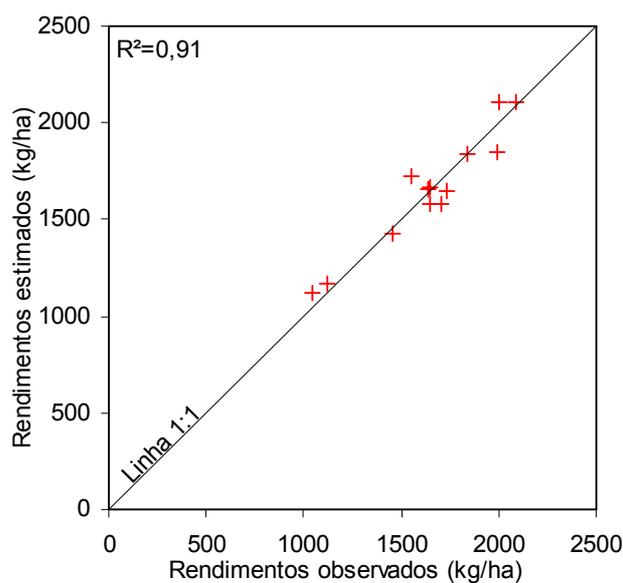


FIGURA 22. Rendimentos de soja estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral em função dos rendimentos observados, considerando os anos de **ajuste**. Período básico: 1982-2000.

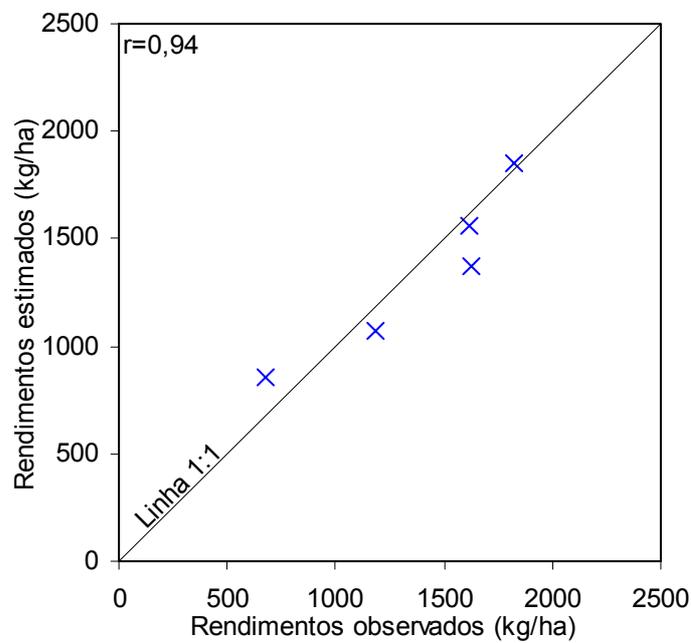


FIGURA 23. Rendimentos de soja estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral em função dos rendimentos observados, considerando os anos de **validação**. Período básico: 1982-2000.

Imagens dos desvios das estimativas dos rendimentos em relação aos rendimentos observados para cada ano da série estudada são apresentadas na Figura 24. As regiões de coloração azulada correspondem às regiões onde o modelo produz uma superestimativa de rendimento, enquanto que as regiões de coloração avermelhada correspondem às regiões de subestimativa de rendimentos. Apesar da aplicação do fator de correção no termo agrometeorológico, ainda são geradas regiões de super e subestimativas de rendimento. No entanto, os desvios do modelo agrometeorológico-espectral são menores do que os desvios produzidos quando o termo agrometeorológico é aplicado isoladamente.

Nas Figuras 25 e 26 são apresentadas as freqüências de ocorrência dos desvios absolutos, entre os rendimentos estimados e observados, nos períodos de ajuste e validação do modelo agrometeorológico-espectral, respectivamente. Observa-se que 90% dos desvios de estimativa, no período de ajuste, ficaram abaixo de 250 kg/ha, sendo que a média dos desvios absolutos neste período foi de 205,03 kg/ha. Já no período de validação, 90 % dos desvios das estimativas do rendimento ficaram abaixo de 300 kg/ha, sendo que a média dos desvios absolutos deste período foi de 207,83 kg/ha.

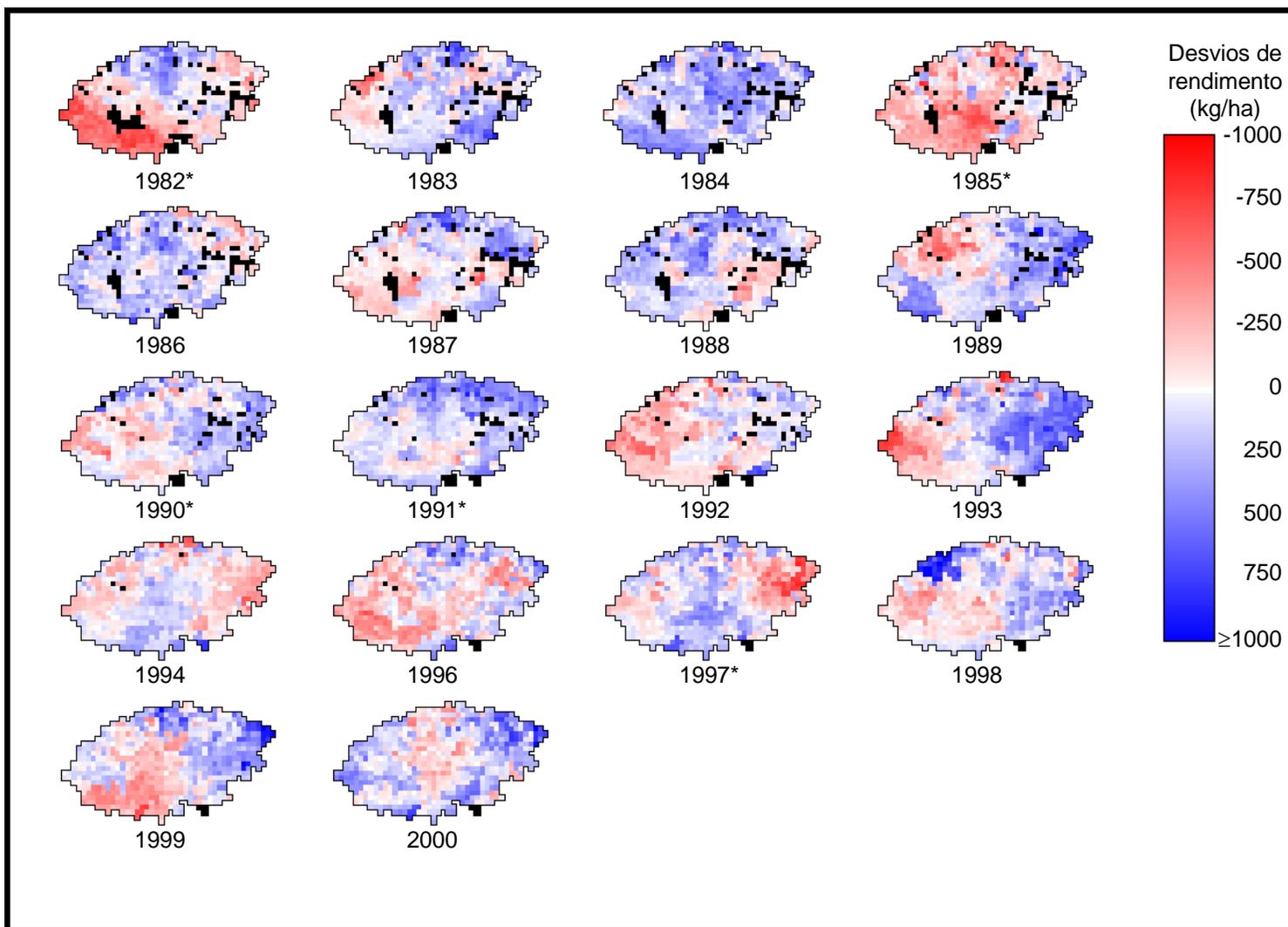


FIGURA 24. Desvios dos rendimentos de soja estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral em relação aos rendimentos observados no período de 1982 a 2000. Os *pixels* pretos indicam ausência de dados (*anos do período de validação).

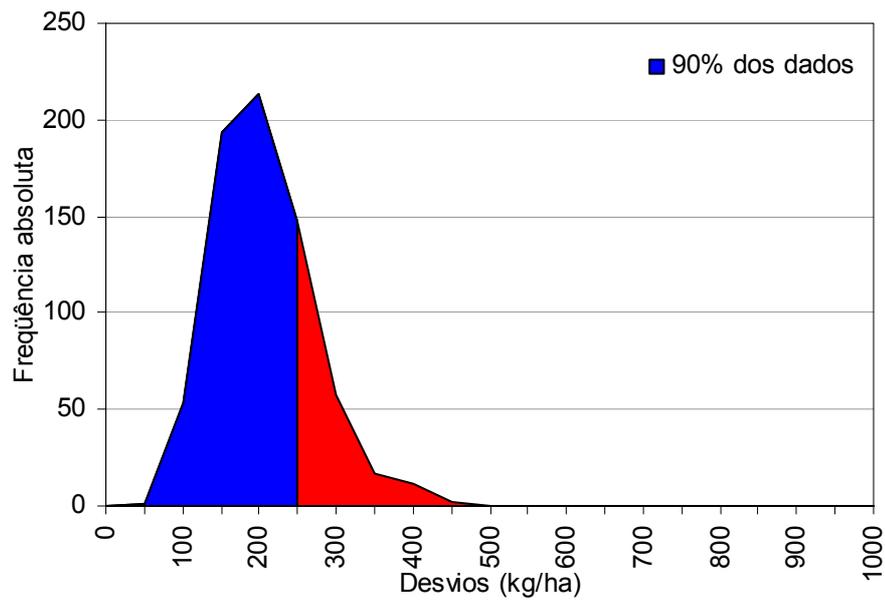


FIGURA 25. Frequência de ocorrência dos desvios absolutos de estimativa do rendimento da soja pelo modelo agrometeorológico-espectral no período de **ajuste**. Período básico: 1982-2000.

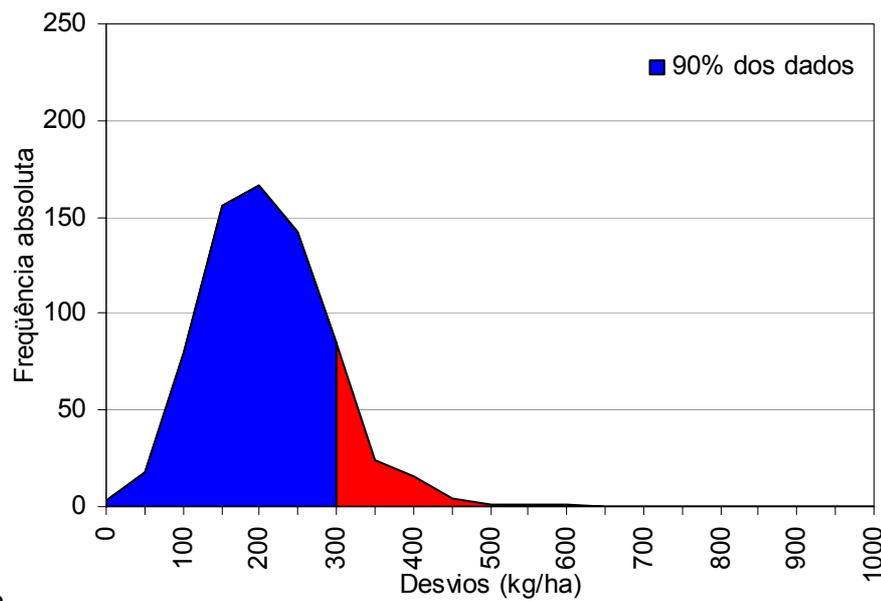
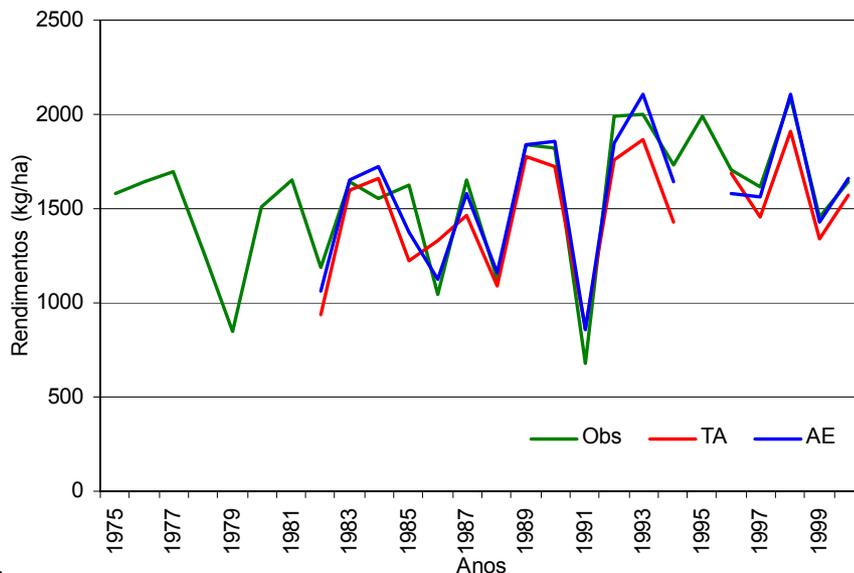


FIGURA 26. Frequência de ocorrência dos desvios absolutos de estimativa do rendimento da soja pelo modelo agrometeorológico-espectral no período de **validação**. Período básico: 1982-2000.

A Figura 27 mostra o desempenho das estimativas do rendimento pelo termo agrometeorológico e pelo modelo agrometeorológico-espectral comparadas aos rendimentos observados durante o período estudado. Nota-se que os rendimentos estimados acompanham a alta variabilidade interanual dos rendimentos observados no Rio Grande do Sul. Comparando-se os resultados do termo agrometeorológico com os resultados obtidos pelo modelo agrometeorológico-espectral, percebe-se que a introdução do termo espectral proporcionou redução nos desvios das estimativas. Verifica-se que em dois períodos, de 1987 a 1992 e de 1997 a 2000, as linhas dos rendimentos apresentaram similaridade, chegando muito próximas da sobreposição, com diferenças inferiores a 200kg/ha.



FIGUR. Rio Grande do Sul, obtidas pelo Termo Agrometeorológico (TA) e pelo Modelo agrometeorológico-espectral (AE), comparadas ao rendimento observado (Obs) ao longo da série estudada.

4.3 Considerações finais e sugestões

A metodologia proposta nesta dissertação mostrou resultados muito promissores para a obtenção das estimativas do rendimento da soja no Rio Grande do Sul. A quantidade de recursos humanos e financeiros empregada para a obtenção das estimativas do rendimento, a partir do modelo agrometeorológico-espectral, é consideravelmente reduzida, se comparada à metodologia atualmente utilizada.

Para a aplicação do modelo é necessária a coleta de dados meteorológicos de apenas três meses (janeiro, fevereiro e março) em sete estações meteorológicas. A implementação de uma rede de distribuição de informações e o estabelecimento de convênios, entre os órgãos responsáveis pela coleta dos dados e as entidades interessadas na obtenção das estimativas do rendimento, é fundamental para introduzir agilidade ao processo.

É necessário, também, a obtenção e o processamento de imagens do sensor AVHRR/NOAA durante o período de dois meses (dezembro e janeiro). Em Porto Alegre, RS, o Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) possui uma estação de recepção destas imagens em tempo real, o que viabiliza o uso do modelo. É necessário, entretanto, verificar a adequação do uso de imagens com resolução espacial de 1x1km na aplicação do modelo, que foi ajustado com imagens com resolução espacial de 9x9 km.

Dando continuidade a este trabalho, pode-se testar se a utilização de valores de coeficiente de cultura, de acordo com a fenologia da soja, assim como da capacidade de água disponível (CAD) para o cálculo do balanço hídrico, de acordo com os solos existentes na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul, proporciona maior precisão das estimativas de rendimento.

Recomenda-se, também, que para verificar a acurácia do modelo seja realizado o acompanhamento de lavouras piloto na região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul, nas quais podem ser instaladas estações meteorológicas automáticas, para coleta de dados, e realizadas medidas radiométricas nos mesmos horários de passagem do satélite. Além disso, o acompanhamento destas lavouras piloto fornece dados precisos de rendimento da cultura da soja. Esta etapa é especialmente importante na medida em que as estimativas geradas pelo modelo agrometeorológico-espectral foram comparadas às estimativas oriundas de estatísticas oficiais e não aos rendimentos observados a campo.

5. CONCLUSÕES

A definição de grupos de municípios pertencentes à região de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul, considerando o rendimento, a produção e a razão entre a área colhida de soja e a área total do município, permite um conhecimento mais detalhado da produção desta cultura no Estado, sendo útil para entidades responsáveis pelo manejo e armazenamento da produção agrícola.

A aplicação do modelo agrometeorológico de Jensen modificado permite que as estimativas do rendimento da cultura da soja, no Estado do Rio Grande do Sul, sejam obtidas com precisão, rapidez, praticidade, objetividade e baixo custo, cerca de um mês antes do final da colheita, o que confere ao mesmo um caráter preditivo.

A aplicação do modelo agrometeorológico-espectral, entretanto, promove melhoria na acurácia das estimativas dos rendimentos quando comparados às estimativas obtidas pelo modelo de Jensen modificado, permitindo a geração de mapas de rendimento de soja para a região de produção significativa desta cultura no Estado do Rio Grande do Sul. O modelo agrometeorológico-espectral considera, além da evapotranspiração relativa, outros fatores que influenciam na determinação dos rendimentos, como, por

exemplo, fertilidade dos solos, cultivar utilizada, incidência de pragas e moléstias, tecnologia empregada, etc.

A utilização de imagens de satélite, recursos de informática e de geoprocessamento permite rapidez na análise de dados e no desenvolvimento de metodologias para avaliação do desenvolvimento das culturas agrícolas. Apesar da baixa resolução espacial das imagens de índice de vegetação utilizadas, estas demonstram ser uma ferramenta adequada para monitorar as condições de desenvolvimento da cobertura vegetal.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ FILHO, A. Botânica e desenvolvimento. In. SANTOS, O.S. (coord.) **A cultura da soja – 1**. Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná. Rio de Janeiro: Globo, 1988. p.27-35.
- BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, p. 161-173, 1991.
- BARNI, N.A. **Modelos de crescimento, desenvolvimento e rendimento do girassol em função da radiação solar, temperatura e disponibilidade hídrica**. 1994. 249f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- BATISTA, G.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; LAWRENCE, W.T. Monitoramento da cobertura vegetal através de índices de vegetação do NOAA-AVHRR. In. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 1993. Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1993. p. 30-37.
- BERGAMASCHI, H. Variations on the brazilian soybean production related to the drought occurrences preliminary analysis. In. WORLD SOYBEAN RESEARCH CONFERENCE, 4, 1989. Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: Asociación Argentina de la Soja, 1989. v.5, p. 2153-2158.
- BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R. **Agroclima da Estação Experimental Agrônômica/UFRGS**. 1990. (Não publicado).
- BERLATO M.A.; GONÇALVES, H.M. Efeito da temperatura no desenvolvimento da soja *Glycine max* (L.) Merr. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.14, n.2, p.235-242, 1978.
- BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Consumo de água da soja: I. Evapotranspiração estacional em condições de ótima disponibilidade de água no solo. In. SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 1978. Londrina. **Anais...** Londrina: EMBRAPA/CNPSo, 1979. p.53-58.

- BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque “classe A” e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.22, n.2, p.243-259, 1986.
- BERLATO, M.A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e deficiência hídrica para o Estado do Rio Grande do Sul**. São José dos Campos: INPE, 1987. 103f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Pós Graduação Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987.
- BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C.; GONÇALVES, H.M. Relação entre o rendimento de grãos da soja e variáveis meteorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.5, p.695-702, 1992.
- BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. Variabilidade interanual de precipitação pluvial e rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.119-125, 1999.
- BONATO, E.R.; IGNACZAK, J.C. **Análise conjunta dos ensaios de cultivares de soja recomendadas para o Rio Grande do Sul, realizados em 1991/92**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1992. 24p.
- BONATO, E.R.; BERTAGNOLLI, P.F.; IGNACZAK, J.C. **Análise conjunta dos ensaios de cultivares de soja recomendadas para o Rio Grande do Sul**. II. Ensaio realizados em três épocas de semeadura, em 1992/93. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1993. 23p.
- BONATO, E.R.; BERTAGNOLLI, P.F.; IGNACZAK, J.C. **Análise conjunta dos ensaios de cultivares de soja recomendadas para o Rio Grande do Sul**. II. Ensaio realizados em três épocas de semeadura, em 1993/94. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1994. 24p.
- CARUSO, R. **Soja, uma caminhada sem fim**. Como a soja conquistou o mundo e o Brasil. [Campinas]: Fundação Cargill, [1997]. 95p.
- CUNHA, G.R.; BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.) **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1992. p.85-97.
- CUNHA, G.R.; HAAS, J.C. **Zoneamento agrícola**: recomendação de épocas de semeadura de soja para o Estado do Rio Grande do Sul – safra 1996/97. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1996. 28p. (EMBRAPA-CNPT. Documentos, 29).
- CUNHA, G.R. et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, p.446-459, 2001. (Nº Especial: Zoneamento Agrícola)

- DELGADO-ROJAS, J.S.; BARBIERI, V. Modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 67-73, 1999.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212p. (Riego y drenaje, 33).
- EIDENSHINK, J.C.; HAAS, R.H. Analyzing vegetation dynamics of land systems with satellite data. **Geocarto International**, Hong Kong, v. 1, p. 53-61, 1992.
- EMATER/RS. **Informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços**. Disponível em <<http://www.emater.tche.br>>. Acesso em: 01 fev. 2002.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA-SPI; Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPSo, 1999. 412p.
- EMBRAPA/CNPSo/PR. **Informações institucionais, produtos, notícias, pesquisas, eventos e serviços**. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/>>. Acesso em: 21 set. 2001.
- FAMURS - Federação das Associações de Municípios do Rio Grande do Sul. **Informações institucionais, produtos, notícias, pesquisas, eventos e serviços**. Disponível em: <<http://dados.famurs.com.br/portal>> Acesso em: 24 ago. 2001.
- FEHR, W.R.; CAVINES, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977, 21p. (Special Report 80)
- FERRAUDO, A.S.; ANDRÉ, R.G.B.; PINHO, S.Z. Modelo agrometeorológico para estimar rendimentos de grãos de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 3, p. 93-96, 1995.
- FONSECA, E.L. **Caracterização espectral e índices de vegetação em *Paspalum notatum* flügge var. *notatum* com vistas à modelagem de crescimento**. 2000. 70f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- FONTANA, D.C. **Índice de vegetação global para o monitoramento da vegetação e sua correlação com elementos agrometeorológicos e rendimento de grãos de soja**. 1995. 133f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

- 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, n.1, p. 87-91, 1996.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa do rendimento da soja no Estado do Rio grande do Sul: um estudo preliminar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, 1998. Santos. **Anais...** Santos: [s.n.], 1998. 1 CD-ROM.
- FONTANA, D.C. et al. **Desenvolvimento e teste de metodologia em monitoramento e previsão de safras no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CEPSSRM/UFRGS, 1999. Não paginado. (Série D: Relatório Técnico 003/99).
- FONTANA, D.C. et al. **Monitoramento e previsão da safra de soja no Brasil**. Porto Alegre: CEPSSRM/UFRGS, 2001a. 115p. (Série D: Relatório Técnico 005/01).
- FONTANA, D.C. et al. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 399-403, 2001b.
- GAMON, J.A. et al. Relationships between NDVI, canopy structure and photosynthesis in three californian vegetation types. **Ecological Applications**, New Jersey, v. 5, n. 1, p.28-41, 1995.
- IBGE. **Informações institucionais, produtos, notícias, pesquisas, eventos e serviços**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda>> Acesso em: 30 ago. 2001.
- IBGE - **Anuário estatístico do Brasil: 1981 - 1996**. Rio de Janeiro: IBGE. v. 41-56.
- JENSEN, M.E. Water consumptions by agricultural plants. In: KOZLOWSKY, T.T.; (Ed.) **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1968. v.2, p.1-22.
- JUSTICE, C.O. et al. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, Basing stoke, v. 6, n.8, p. 999-1318, 1985.
- JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; KALB, V.L. Representation of vegetation by continental data sets derived from NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, Basing stoke, v. 12, n.5, p. 999-1021, 1991.
- KIDWELL, K.B.C. **Global vegetation index: user guide**. Washington: US Department of Commerce, 1990. 40p.

- KÖPPEN, W. **Climatología**. México, DF: Fondo de Cultura Económica. 1948. 71p.
- MASSELLI, F. et al. Environmental monitoring and crop forecasting in the Sahel through the use of NOAA NDVI data. A case study: Niger 1986-89. **International Journal of Remote Sensing**, Basing stoke, v.4, p.3471-87, 1993.
- MASSIGNAM A.M. et al. Ecofisiologia do feijoeiro. V – Relação entre o rendimento de grãos e a deficiência hídrica do solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 63-68, 1998.
- MATZENAUER, R. et al. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.1, n.2. p.225-241, 1995.
- MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. 105p. (Boletim FEPAGRO,10).
- MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46p.
- MOTTA, J.L.G.; FONTANA, D.C.; WEBER, E. Evolução temporal do NDVI/NOAA em áreas cobertas por *pixels* com proporções variáveis de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, 2002. Enviado para publicação.
- PASCALE, A. J. Tipos agroclimáticos para el cultivo de la soja en la Argentina. **Revista de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de Buenos Aires**, Buenos Aires, v.17, n.3, p.31-48, 1969.
- PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. **Netherland Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.4, p.9-29, 1956.
- RASMUSSEN, M.S. Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from AVHRR. **International Journal of Remote Sensing**, Basing stoke, v.13, p.3431-42, 1992.
- RIO GRANDE DO SUL. Instituto de Pesquisas Agronômicas. Seção de Ecologia Agrícola. **Atlas Agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 1989. V.1.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura e Abastecimento. Centro Nacional da Pesquisa do Trigo. **Macrozoneamento agroecológico e econômico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1994. v.2.

- ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: NASA ERTS SYMPOSIUM, 3, 1973. Maryland. **Anais...** Washington, D.C.: NASA, 1973. v.1, p.309-317.
- RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.31, p.53-63, 1990a.
- 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, 1990b.
- SCHNEIDER, F.M. et al. O clima. In. SANTOS, O.S. (coord.) **A cultura da soja – 1**. Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná. Rio de Janeiro: Globo, 1988. p.39-58.
- THORNTON, C.W.; MATHER, J.R. The water budget and its use in irrigation. In. THE YEARBOOK OF AGRICULTURE: Water. Washington, D.C.: Department of Agriculture, 1955. p.346-58.