

# Modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul

## Agrometeorological-spectral model to estimate irrigate rice grain yield in the State of Rio Grande do Sul, Brazil

Eliana Veleda Klering<sup>1\*</sup>, Denise Cybis Fontana<sup>1,2</sup>, Vinícius Serafini Roglio<sup>1</sup>, Rita de Cássia Marques Alves<sup>1</sup>, Moacir Antonio Berlato<sup>2</sup>

1. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia - Porto Alegre (RS), Brasil.

2. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia - Porto Alegre (RS), Brasil.

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi elaborar e testar um modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado para o Estado do Rio Grande do Sul. Para as seis regiões orizícolas do Estado, foram utilizados dados de área cultivada e rendimento de grãos de arroz irrigado, dados meteorológicos e imagens do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), de agosto a abril, para as safras de 2000/2001 até 2009/2010. A temperatura mínima do ar e o NDVI estão associados ao rendimento de grãos de arroz irrigado em diversos períodos do desenvolvimento da cultura. O modelo agrometeorológico-espectral para estimativa de produtividade de grãos, ajustado através da abordagem orientada pelas relações clima-planta, é adequado às estimativas em nível regional, podendo fornecer estas com cerca de um mês de antecedência ao final da colheita.

**Palavras-chave:** *Oryza Sativa*, índice de vegetação por diferença normalizada, previsão de safras.

**ABSTRACT:** The objective of this study was to estimate the irrigated rice grain yield through the adjustment of the agrometeorological-spectral model in the State of Rio Grande do Sul, Brazil. For the six rice-growing regions of the State, the data on irrigated rice grain yield and crop area, meteorological data and the Normalized Difference of Vegetation Index (NDVI) images of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) sensor were used from August to April, for the 2000/2001 to 2009/2010 crop seasons. The minimum air temperature and NDVI are associated to the irrigated rice grain yield in several crop development periods. The agrometeorological-spectral model to estimate irrigated rice grain yield, adjusted through the oriented approach by the climate-plant relationship, is adequate for the estimates at regional levels. This could predict the estimates one month before the end of the harvest.

**Key words:** *Oryza Sativa*, normalized difference of vegetation index, harvest forecast.

\*Autor correspondente: [elianavk@gmail.com](mailto:elianavk@gmail.com)

Recebido: 6 Jul. 2015 – Aceito: 26 Out. 2015

## INTRODUÇÃO

O Estado Rio Grande do Sul é considerado estabilizador da safra nacional de arroz, tendo sido responsável, na safra 2013/2014, por 67,8% da produção brasileira (8,2 milhões de toneladas), com área cultivada superior a 1,11 milhão de hectares (IBGE 2015). Entretanto, a variabilidade interanual da produtividade de grãos é alta, em função, principalmente, de condições meteorológicas adversas à produção. Dessa forma, o monitoramento agrometeorológico torna-se ferramenta importante às políticas de segurança alimentar.

A geração de informações acerca de estimativas agrícolas no Brasil é realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Nesses levantamentos, são considerados dados obtidos através de entrevistas com produtores, cooperativas agrícolas e informações de crédito agrícola (Junges e Fontana 2011). A obtenção dessas informações é trabalhosa e onerosa, e os dados coletados, de certa forma, são subjetivos (Liu 2007). Além disso, a metodologia não permite uma análise quantitativa de eventuais erros (Rizzi e Rudorff 2005). Nesse escopo, torna-se importante a proposição de métodos objetivos e de fácil implementação que possam ser utilizados como complemento à metodologia oficial de previsão de safras.

No que se refere à estimativa de produtividade, resultados de diversos trabalhos têm comprovado a viabilidade do uso da modelagem agrometeorológica incorporada aos levantamentos oficiais, introduzindo objetividade. Esses modelos são fundamentados no fato de que a definição da produtividade da cultura é principalmente influenciada pelas condições meteorológicas (Carmona e Berlatto 2002). A inclusão de uma componente espectral a esses modelos gera os modelos agrometeorológicos-espectrais e permite que outras variáveis que influenciam a produtividade, tais como práticas de manejo e tipo de cultivar, sejam contempladas (Melo et al. 2008). Um dos indicadores espectrais mais utilizados é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), pois indica associação entre sua grandeza e as condições de biomassa da cultura (Motta et al. 2003). Em escala regional, as imagens NDVI do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) são uma alternativa devido à cobertura global diária, larga faixa de imageamento e disponibilidade de séries contínuas desde o ano 2000 (Rizzi e Rudorff 2007).

Em tese, maiores valores de NDVI correspondem a um maior acúmulo de biomassa, e o acúmulo desta está

relacionado à maior produtividade. No entanto, após o máximo acúmulo de biomassa, a produtividade pode ser penalizada em função da ocorrência de elementos agrometeorológicos adversos aos processos de formação e enchimento do grão, especialmente a ocorrência de baixas temperaturas.

Apesar de não poder ser considerada isoladamente, a temperatura é um dos elementos meteorológicos que exerce maior influência na produtividade do arroz irrigado. Em geral, a cultura exige temperaturas elevadas da germinação à maturação, uniformemente crescentes até a floração e decrescentes — porém sem diminuições bruscas — após a floração (Heinemann et al. 2009; SOSBAI 2010). A temperatura crítica de 15 °C, para a fase reprodutiva, tem sido usada como referência em estudos climatológicos para o arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Steinmetz et al. 2001). Assim, a temperatura mínima do ar pode ser considerada como indicador agrometeorológico da produtividade de arroz irrigado. Esse elemento influencia o crescimento e o desenvolvimento das plantas e, portanto, responde por parte importante da variabilidade da produtividade no Estado (Klering, et al. 2008).

Dentro desse contexto, este trabalho teve como objetivo elaborar e testar um modelo agrometeorológico-espectral para estimar a produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

## MATERIAL E MÉTODOS

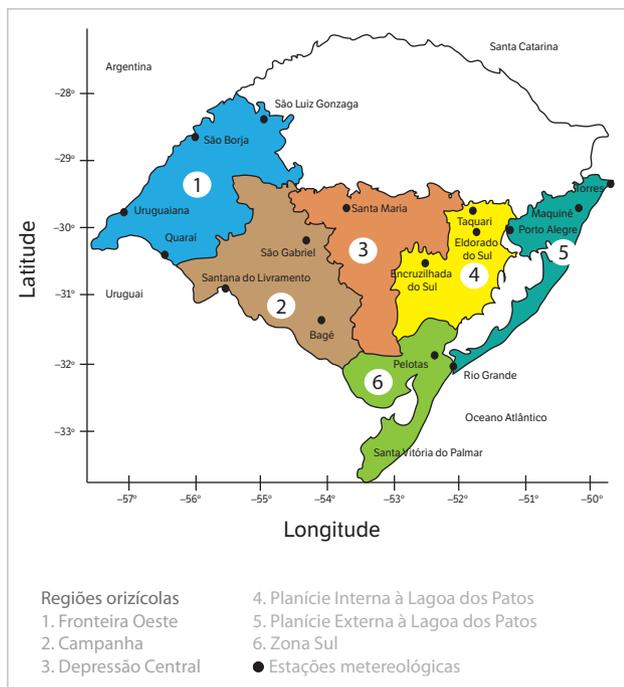
A área de estudo compreendeu a região produtora de arroz irrigado do Rio Grande do Sul, que se localiza entre as latitudes 28°00' e 33°45' Sul e longitudes 49°43' e 57°39' Oeste. A região é dividida, segundo as regiões político-administrativas do Instituto Rio Grandense do Arroz Irrigado (IRGA), da seguinte forma: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna à Lagoa dos Patos, Planície Externa à Lagoa dos Patos e Zona Sul (Figura 1).

Para o estudo, foram utilizados dados oficiais de área cultivada e produtividade de arroz irrigado de todos os municípios pertencentes a cada região orizícola, para 10 safras agrícolas (2000/2001 a 2009/2010), obtidos do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) do IBGE. Para cada safra, foi determinada a produtividade média de cada região orizícola, a partir da média dos municípios que compõem as diferentes regiões.

Foram utilizados, também, dados meteorológicos diários de temperatura mínima do ar de 17 estações meteorológicas (Figura 1), incluídas dentro da região de estudo, pertencentes ao 8.º Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia (8.º DISME/INMET) e à Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio Grande do Sul (FEPAGRO-RS), para o período correspondente a setembro de 2000 até abril de 2010.

Os dados espectrais utilizados no estudo corresponderam às imagens de satélite provenientes do sensor MODIS, produto MOD13Q1, coleção 5, que contém composições de imagens de 16 dias sob a forma dos índices de vegetação NDVI e *Enhanced Vegetation Index* (EVI), além da reflectância de superfície correspondente às bandas do azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio, em uma resolução espacial de 250 m. Esse produto foi obtido de forma gratuita, mediante cadastro antecipado, através do site do Sistema de Observação da Terra (EOS) da NASA (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>) para o período de setembro de 2000 até abril de 2010. Utilizaram-se neste trabalho apenas as imagens referentes ao NDVI.

Os dados de NDVI médio das áreas produtoras em cada regional foram extraídos a partir da construção das máscaras de cultivo, utilizando-se uma metodologia para mapeamento de áreas de arroz irrigado proposto por Klering et al. (2013).

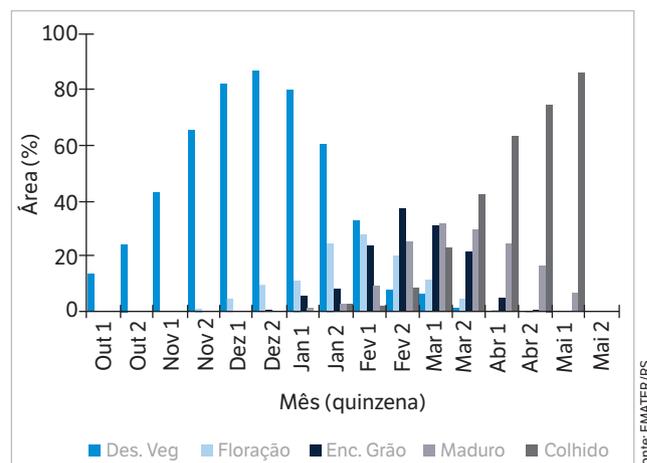


**Figura 1.** Regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul e estações meteorológicas utilizadas no estudo.

As máscaras de cultura foram construídas através da classificação digital supervisionada de composições coloridas de imagens multitemporais NDVI/MODIS, de determinados períodos do ciclo da cultura, denominadas composições RGB (R = vermelho, G = verde, B = azul).

Segundo o calendário agrícola médio do arroz irrigado no Rio Grande do Sul, disponibilizado pela Associação Rio-Grandense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER-RS), a cultura é implantada na primeira quinzena de outubro, tem a lâmina d'água aplicada na segunda quinzena de novembro e atinge o máximo crescimento vegetativo na primeira quinzena de janeiro (Figura 2). Com base nessa informação, a imagem correspondente ao menor crescimento vegetativo foi alocada no canal verde; no canal azul, foi colocada a imagem correspondente ao período de implementação da cultura; e, no canal vermelho, foi colocada a imagem correspondente ao período de maior crescimento vegetativo. Através dessas composições RGB, destacam-se as áreas com maior crescimento vegetativo, as quais provavelmente estão associadas às lavouras de arroz irrigado. Para cada safra, foram geradas três composições, deslocando-se em dois períodos de 16 dias os máximos e mínimos NDVIs, conforme a disponibilidade das imagens MODIS. A partir das três composições, foi utilizado o método de classificação digital supervisionada Paralelepípedo. Para a obtenção da máscara final de cada safra, foi feita a sobreposição das máscaras correspondentes às composições RGB. Todo o processamento de imagens MODIS/NDVI foi realizado no programa computacional Envi 4.3.

Os dados meteorológicos diários (temperatura mínima do ar e número de dias com temperatura mínima do ar



**Figura 2.** Calendário agrícola médio do arroz irrigado, safras 2000/2001 a 2004/2005 para o Estado do Rio Grande do Sul.

igual ou inferior a 15 °C) foram agrupados em períodos de 16 dias correspondentes aos dias utilizados na composição das imagens NDVI/MODIS, conforme descrito em MODIS (2003). Para cada região orizícola e para cada período de 16 dias, foram calculadas as médias das temperaturas mínimas e computados os dias com temperatura mínima menor ou igual a 15 °C.

As variáveis meteorológicas e espectrais (NDVI) foram correlacionadas (Pearson) com a produtividade de grãos de arroz irrigado para cada região orizícola. Assim, buscou-se definir os períodos que se constituíram como melhores indicadores agrometeorológicos e espectrais para comporem o modelo de estimativa de produtividade de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. As significâncias das correlações foram testadas através do teste *t* de Student.

Em virtude de a produtividade de arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas responder de maneira semelhante frente às condições meteorológicas e de biomassa da cultura, conforme demonstrado por Klering et al. (2013), ajustou-se um único modelo, utilizando variáveis *dummies* (binárias) para indicação de cada região. Essa estratégia permite um melhor aproveitamento dos dados, dado o número limitado de observações do estudo, além de incorporar mudanças no intercepto de acordo com cada região (Montgomery et al. 2012). O modelo foi ajustado através de regressão linear múltipla com  $m - 1$  variáveis *dummies* e  $k - m + 1$  variáveis independentes dadas por:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{n=1}^{m-1} \beta_n D_{nj} + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ij} + \varepsilon_j \quad (1)$$

onde:  $Y_i$  é o valor da produtividade de grãos ( $t \cdot ha^{-1}$ );  $\beta_0$  é o intercepto do modelo ( $t \cdot ha^{-1}$ );  $\beta_n$  é o coeficiente linear ( $t \cdot ha^{-1}$ ) da variável *dummy*;  $D_{nj}$  é a variável *dummy* indicadora da região  $n$  da observação  $j$ ;  $\beta_i$  é o coeficiente de regressão das variáveis independentes quantitativas ( $t \cdot ha^{-1}$  por ano);  $X_{ij}$  é a variável independente  $i$  na observação  $j$ ;  $\varepsilon_j$  é o erro associado à variável  $Y$  na observação  $j$  ( $t \cdot ha^{-1}$ ).

As  $m - 1$  variáveis *dummies* são oriundas das  $m$  categorias da variável qualitativa “região” e operam com a imputação dos valores 1 ou 0. Atribui-se 1 à *dummy* que indique a região de interesse para estimação e 0 para as outras, ou então 0 a todas para que a estimação seja da região de referência (cujo coeficiente linear está incorporado no intercepto).

Para o ajuste da regressão, através da Equação 1, pressupõe-se que a variável dependente  $Y_i$  é uma função

linear das variáveis independentes; os valores das variáveis independentes são fixos; e os erros têm média zero, são homocedásticos, independentes e de distribuição normal (Souza 1998). Assim, procedeu-se à análise de resíduos do modelo através dos testes de Breush-Pagan (para homocedasticidade), Durbin-Watson (para independência) e Shapiro-Wilk (para normalidade). Também, foram efetuadas análises de diagnóstico para a detecção de *outliers* (*boxplots* padronizados), para averiguar a multicolinearidade (análise de VIF — Inflação de Variância) e, também, para testar a má especificação ou não linearidade do ajuste (teste RESET).

Por fim, para o ajuste do modelo, primeiramente selecionou-se um conjunto de variáveis com correlações estatisticamente significativas com a produtividade de arroz irrigado e que não apresentavam relação espúria com o mesmo, ou seja, a efetiva relação de cada variável com a produtividade de grãos foi considerada de acordo com a abordagem clima-planta encontrada em revisão bibliográfica pertinente ao tema. As variáveis previamente definidas foram submetidas a um procedimento de *stepwise*, com critério de  $p < 0,05$  para entrada e  $p < 0,1$  para saída.

Neste estudo, todas as análises estatísticas foram realizadas através da utilização do software livre R versão 3.1.1.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da Tabela 1 mostra que os padrões de correlações obtidos refletem adequadamente a relação conhecida entre o acúmulo de biomassa verde (NDVI) e produtividade de grãos ao longo do ciclo da cultura. Observa-se que a maior parte das correlações foram negativas no período de implantação (setembro, outubro e novembro), positivas durante o período de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo (dezembro, janeiro até meados de fevereiro) e, novamente, negativas após o florescimento até o final do ciclo (final de fevereiro, março e abril).

As correlações negativas, significativas estatisticamente, obtidas no início e final do ciclo da cultura, provavelmente estão relacionadas à implementação das lavouras e conseqüentemente à colheita do grão dentro do período recomendado. Entretanto, convém salientar que as medidas de reflectância obtidas nas etapas iniciais do ciclo de culturas agrícolas contêm, também, informações sobre tipo, conteúdo e matéria orgânica do solo (Chang et al. 2003).

**Tabela 1.** Coeficientes de correlação de Pearson entre os valores de índice de vegetação por diferença normalizada de 16 dias e a produtividade de arroz irrigado, para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/2001 até 2009/2010.

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

1 = Fronteira Oeste; 2 = Campanha; 3 = Depressão Central; 4 = Planície Interna à Lagoa dos Patos; 5 = Planície Externa à Lagoa dos Patos; 6 = Zona Sul. \*\*\*p < 0,01; \*\*p < 0,05; \*p < 0,1.

As correlações positivas significativas entre a produtividade de grãos de arroz irrigado e os valores de NDVI dos meses correspondentes ao florescimento (janeiro e fevereiro) refletiram o acúmulo de biomassa verde pela cultura e a relação deste com a produtividade. Nesse escopo, ressalta-se que maiores acúmulos de biomassa correspondem à maior quantidade de fotoassimilados disponíveis para formação e enchimento do grão e, na ausência de outros fatores, indicam maior produtividade de grãos.

A associação do NDVI com produtividade de grãos de arroz irrigado tem sido investigada, mostrando um padrão de resposta semelhante aos encontrados neste trabalho (Chang et al. 2005; Sakamoto et al. 2005; entre outros). O uso desse índice nos modelos, em geral, contribui para espacialização mais realística das estimativas da produtividade de grãos, dada a disponibilidade de dados com uma resolução espacial de 250 m. Entretanto, salientam-se duas importantes limitações dessa técnica, cujo entendimento é importante para a interpretação dos resultados: (1) os indicadores espectrais (valores de NDVI) podem estar refletindo possíveis erros relacionados à construção das máscaras de cultivo, ou seja, podem estar relacionados a outras culturas agrícolas ou vegetação natural de ciclo semelhante ao cultivo de interesse (Adami et al. 2007; Motohka et al. 2009); (2) as maiores correlações entre as produtividades de grãos de arroz irrigado e o NDVI são obtidas no período de máximo desenvolvimento vegetativo; no entanto, a resposta

espectral desse período é influenciada pela característica de saturação desse índice de vegetação (Jensen 2009). Assim, mesmo que a cultura continue apresentando incrementos de biomassa, os valores de NDVI não sofrem alterações proporcionais.

As correlações envolvendo a temperatura mínima do ar (temperatura mínima do ar e número de dias com temperatura mínima do ar igual ou inferior a 15 °C) e a produtividade de arroz irrigado apresentaram valores negativos em todas as regiões, nos períodos de implementação e reprodutivo da cultura. Conforme apontado por Carmona e Berlato (2002), a maior ocorrência de dias com temperaturas baixas nesses períodos é um fator que pode penalizar a produtividade.

Quanto aos coeficientes de correlação entre as temperaturas mínimas e a produtividade de grãos de arroz irrigado, pode-se observar, na Tabela 2, que as correlações negativas significativas foram observadas nas regiões Fronteira Oeste, Campanha e Planície Interna no início de outubro. Esse fato pode estar associado à redução da produtividade de grãos em decorrência de baixas temperaturas logo após a semeadura (Steinmetz et al. 2009).

Com relação à temperatura mínima do ar igual ou inferior a 15 °C (Tabela 3), o mês mais crítico foi março. Nesse mês, foram observados os maiores valores negativos de correlação na maioria das regiões. Ressalta-se que, embora parte das áreas cultivadas já tenha ultrapassado o período reprodutivo

no mês de março, é justamente nesse mês que a frequência de ocorrências de temperaturas abaixo de 15 °C é maior, o que pode penalizar a produtividade da cultura (Steinmetz et al. 2001). Esses resultados, especialmente para as regiões Campanha e Zona Sul, onde houve significância estatística,

concordam com o mapeamento do risco de frio durante o período reprodutivo do arroz irrigado no Rio Grande do Sul proposto por Steinmetz e Amaral (2002). Segundo os autores, é nessas regiões que o risco de ocorrência de temperatura mínima do ar igual ou inferior a 15 °C é mais acentuado. →

**Tabela 2.** Coeficientes de correlação de Pearson entre a temperatura mínima do ar de 16 dias e a produtividade de arroz irrigado para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/2001 até 2009/2010.

Mês		Região orizícola					
		1	2	3	4	5	6
Outubro	1	-0,63**	-0,55**	-0,36	-0,58**	-0,24	-0,31
	2	0,61**	0,23	0,71**	0,72***	0,60**	0,37
Novembro	1	-0,08	-0,04	-0,09	-0,03	0,16	-0,14
	2	-0,15	-0,11	0,13	-0,05	0,01	0,44*
Dezembro	1	-0,08	-0,10	0,01	-0,63**	-0,09	-0,14
	2	0,23	-0,14	-0,02	0,08	0,71***	0,25
Janeiro	1	0,01	0,10	0,04	-0,32	0,10	0,03
	2	-0,14	-0,11	-0,08	0,12	0,09	0,19
Fevereiro	1	0,11	0,34	-0,37	-0,31	-0,29	-0,02
	2	0,25	0,29	0,03	0,18	0,31	0,47*
Março	1	-0,49*	-0,28	-0,34	-0,60**	-0,58**	-0,51*
	2	0,10	0,45*	0,02	0,12	0,18	0,30
Abril	1	-0,26	-0,02	-0,23	-0,15	-0,15	-0,29
	2	0,04	-0,04	-0,54*	-0,19	-0,44*	0,10

1 = Fronteira Oeste; 2 = Campanha; 3 = Depressão Central; 4 = Planície Interna à Lagoa dos Patos; 5 = Planície Externa à Lagoa dos Patos; 6 = Zona Sul. \*\*\*p < 0,01; \*\*p < 0,05; \*p < 0,1.

**Tabela 3.** Coeficientes de correlação de Pearson entre o número de dias com temperatura mínima do ar igual ou inferior a 15 °C e a produtividade de arroz irrigado para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/2001 até 2009/2010.

Mês		Região orizícola					
		1	2	3	4	5	6
Outubro	1	-0,51*	0,29	0,32	0,19	-0,24	0,30
	2	0,29	0,39	-0,02	0,46*	0,60**	0,19
Novembro	1	-0,03	-0,13	-0,10	0,37	0,16	-0,09
	2	0,01	0,06	0,17	0,05	0,01	-0,29
Dezembro	1	0,32	0,16	0,38	0,32	-0,09	0,12
	2	0,04	0,05	-0,14	-0,60**	0,71***	-0,51*
Janeiro	1	0,03	0,01	0,40	0,41	0,10	0,08
	2	0,15	0,08	0,23	0,05	0,09	0,03
Fevereiro	1	-0,17	-0,26	0,17	0,11	-0,29	-0,08
	2	-0,27	-0,47*	-0,36	-0,20	0,31	-0,40
Março	1	0,11	-0,14	0,48*	0,48*	-0,58**	0,36
	2	-0,64**	-0,70***	-0,53**	-0,56**	0,18	-0,57**
Abril	1	-0,22	-0,45*	0,06	0,08	-0,15	0,09
	2	0,66**	0,26	0,52**	0,40	-0,44*	-0,33

1 = Fronteira Oeste; 2 = Campanha; 3 = Depressão Central; 4 = Planície Interna à Lagoa dos Patos; 5 = Planície Externa à Lagoa dos Patos; 6 = Zona Sul. \*\*\*p < 0,01; \*\*p < 0,05; \*p < 0,1.

Para o ajuste do modelo, a escolha das variáveis independentes se deu de maneira orientada com base nas relações clima-planta, considerando-se o pressuposto de que informações sequenciais de NDVI indicam as condições reais de desenvolvimento das lavouras, tanto em termos ambientais quanto em relação às práticas de manejo, cultivares utilizadas e condições hídricas do solo.

Quanto ao ajuste do modelo, verifica-se que as variáveis espectrais selecionadas foram os NDVIs correspondentes ao primeiro período de novembro ( $NDVI_{Nov1}$ ) e ao segundo do mês de março ( $NDVI_{Mar2}$ ). Já as variáveis agrometeorológicas selecionadas foram o número de dias com temperatura mínima do ar igual ou inferior a 15 °C correspondentes ao segundo período de outubro ( $NDIAS_{Out2}$ ) e ao segundo período de março ( $NDIAS_{Mar2}$ ) e, por fim, a temperatura mínima do primeiro período de março ( $TMIN_{Mar1}$ ). Dessa forma, o modelo, construído a partir do método *stepwise*, apresentou a característica de penalização do indicador espectral NDVI frente à ocorrência de elementos meteorológicos adversos ao desenvolvimento das plantas (baixas temperaturas no início do período vegetativo e no período reprodutivo) e com reais implicações na definição de produtividade final de grãos.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo foi de 0,738, ou seja, 73,8% da variabilidade da produtividade de grãos de arroz irrigado foi explicada pelas variáveis incluídas no ajuste. Esse coeficiente de determinação obtido foi superior aos encontrados por Klering et al. (2008) em ajustes de modelos somente com variáveis agrometeorológicas para o arroz irrigado no Rio Grande do Sul, que variaram entre 0,24 e 0,56, evidenciando que a incorporação da componente espectral propicia a melhoria das estimativas de produtividade.

A região de referência do ajuste foi a Campanha, ou seja, o coeficiente linear desta foi incorporado ao intercepto. Assim, para a estimativa de produtividade de grãos de arroz irrigado para essa região, deve-se atribuir o valor 0 às demais variáveis indicativas de região. A equação de regressão linear múltipla ajustada neste trabalho foi a seguinte:

$$Y = 15,43 - 0,82Reg1 - 0,82Reg3 - 0,92Reg4 - 1,82Reg5 - 1,47Reg6 - 5,17NDVI_{Nov1} - 6,04NDVI_{Mar2} - 0,06NDIAS_{Out2} - 0,12NDIAS_{Mar2} - 0,09TMIN_{Mar1} \quad (2)$$

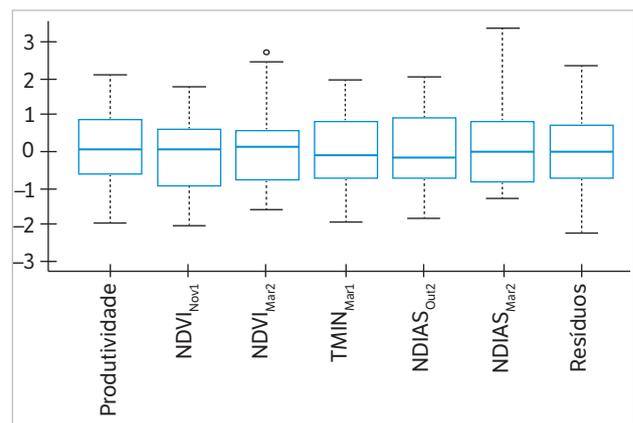
$$R^2 = 0,738$$

onde:  $Y$  é a produtividade estimada de grãos de arroz irrigado ( $t\cdot ha^{-1}$ ); Reg1 corresponde à região da Fronteira Oeste; Reg3 corresponde à Depressão Central; Reg4 corresponde à Planície Interna à Lagoa dos Patos;

Reg5 corresponde à Planície Externa à Lagoa dos Patos; Reg6 corresponde à Zona Sul;  $NDVI_{Nov1}$  é o NDVI observado no primeiro período de novembro;  $NDVI_{Mar2}$  é o NDVI observado no segundo período de março;  $NDIAS_{Out2}$  é o número de dias com temperatura mínima do ar igual ou inferior a 15 °C no segundo período de outubro;  $NDIAS_{Mar2}$  é o número de dias com temperatura mínima do ar igual ou inferior a 15 °C no segundo período de março;  $TMIN_{Mar1}$  é a temperatura mínima do ar no primeiro período de março.

Conforme a análise de resíduos, os pressupostos do modelo de regressão linear múltipla foram satisfeitos. O teste de Breush-Pagan ( $BP = 8,93$ ;  $p = 0,54$ ) confirmou a homocedasticidade. Através do teste de Shapiro-Wilk ( $W = 0,99$ ;  $p = 0,91$ ), concluiu-se que os resíduos são normais; já o teste de Durbin-Watson ( $DW = 1,84$ ;  $p = 0,08$ ) evidenciou a independência dos mesmos. Segundo as técnicas de diagnóstico utilizadas, não foram identificadas irregularidades que prejudicassem o ajuste do modelo. Através de gráficos *boxplot* padronizados, não foram detectados *outliers* (Figura 3). A multicolinearidade foi verificada por meio do cálculo das VIF e não apresentou problemas ( $NDVI_{Nov1} = 2,21$ ,  $NDVI_{Mar2} = 1,72$ ,  $TMIN_{Mar1} = 1,41$ ,  $NDIAS_{Out2} = 1,22$  e  $NDIAS_{Mar2} = 1,30$ ). Através do teste RESET ( $RESET = 0,09$ ;  $p = 0,91$ ), concluiu-se que não há problema de má especificação ou não linearidade.

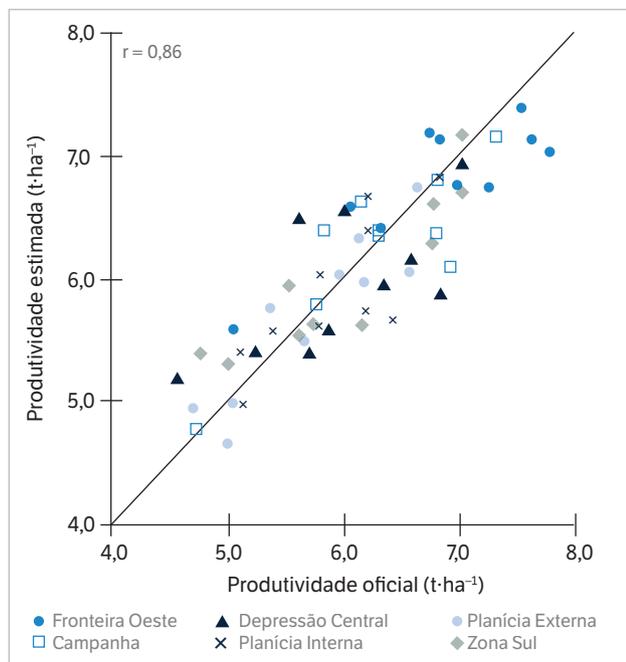
Na Figura 4, observa-se que as estimativas de produtividade de grãos do arroz irrigado foram consistentes e próximas aos dados oficiais nas diferentes regiões. As regiões que apresentaram melhor distribuição dos pontos, com relação à reta 1:1, foram a Planície Externa e a Zona Sul, sendo os coeficientes de correlação de 0,91 e 0,89, respectivamente (Tabela 4). As piores estimativas foram obtidas para as regiões



**Figura 3.** Boxplot padronizado das variáveis independentes e dos resíduos.

da Depressão Central ( $r = 0,66$ ) e Planície Interna à Lagoa dos Patos ( $r = 0,79$ ). Com relação à diferença média entre as produtividades oficiais (IBGE) e as estimadas a partir do modelo agrometeorológico espectral, as maiores discrepâncias observadas foram de  $0,40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  na região da Fronteira Oeste e de  $0,35 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  na região da Depressão Central.

Assim, o modelo agrometeorológico-espectral para estimar a produtividade de grãos do arroz irrigado é condizente com



**Figura 4.** Dispersão entre os valores estimados e os observados (oficiais) de produtividade de grãos de arroz irrigado, ajustados através do modelo agrometeorológico-espectral, para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/2001 até 2009/2010.

**Tabela 4.** Coeficientes de correlação de Pearson entre as produtividades oficial e estimada de grãos de arroz irrigado, bem como a diferença média entre as produtividades oficiais e as estimadas a partir do modelo agrometeorológico-espectral, para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Período: safras agrícolas de 2000/2001 até 2009/2010.

Região orizícola	$r^{**}$	Diferença média ( $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ )
Fronteira Oeste	0,86	0,40
Campanha	0,84	0,27
Depressão Central	0,66	0,35
Planície Interna à Lagoa dos Patos	0,79	0,29
Planície Externa à Lagoa dos Patos	0,91	0,23
Zona Sul	0,89	0,31

\*\* $p < 0,05$  pelo teste  $t$  de Student.

a realidade espaço-temporal de todas as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Entretanto, a regressão linear múltipla ajustada tem caráter empírico e não deve ser utilizada para condições distintas daquelas para as quais foi desenvolvida.

Outro fator que deve ser considerado são os dados meteorológicos utilizados para o ajuste do modelo. Em função das poucas estações meteorológicas com séries de observações contínuas, dentro do período de estudo, foram utilizados dados de, no máximo, quatro estações por região orizícola (Figura 1). Mesmo assim, os resultados das estimativas de produtividade de grãos podem ser considerados satisfatórios. Entretanto, a caracterização das condições meteorológicas com maior detalhamento (maior número de dados meteorológicos) pode tornar as estimativas de produtividade de grãos de arroz irrigado mais precisas.

Cabe ainda salientar características interessantes do modelo ajustado. É considerada a relação clima-planta na definição das variáveis independentes, o que confere coerência ao modelo. Os dados de entrada do modelo são conhecidos e operacionalmente disponibilizados, o que permite a utilização deste como complementar ao atual sistema de previsão de safras. Outro aspecto a que se deve atentar é de que, no final do mês de março, quando a colheita ainda não foi finalizada, é possível ter a estimativa da produção de grãos, dada pelo produto da produtividade pela área cultivada, o que pode subsidiar ações de gerenciamento de safras e políticas de abastecimento. As características de baixo custo, devido à disponibilização gratuita de imagens MODIS, a facilidade de processamento, e a menor subjetividade das estimativas também contribuem para tanto.

A capacidade preditiva do modelo foi investigada através da comparação com dados oficiais, os quais também são gerados por estimativas de área cultivada e produção divulgadas pelo IBGE. É importante salientar que tanto os dados oficiais quanto os gerados pelo modelo agrometeorológico-espectral ajustado neste estudo correspondem a estimativas; sendo assim, é esperado que mostrem discrepâncias. Quando ambas as estimativas se aproximam, a chance de acerto é maior. Quando há discrepância, fica a dúvida de qual estimativa é mais aproximada da realidade do campo.

## CONCLUSÃO

O modelo agrometeorológico-espectral para estimativa de produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do

Sul, ajustado através da abordagem orientada pelas relações clima-planta, é adequado às estimativas em nível regional. O modelo tem capacidade para estimar a produtividade de grãos com cerca de um mês de antecedência ao final da colheita.

Além disso, apresenta as características de baixo custo e fácil implementação. Essas características permitem concluir que o modelo ajustado pode ser utilizado como complemento ao sistema atual de previsão de safras, introduzindo objetividade.

## REFERÊNCIAS

- Adami, M., Moreira, M. A., Rudorff, B. F. T., Freitas, C. C., Faria, R. T. e Deppe, F. (2007). Painel amostral para estimativa de áreas agrícolas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42, 81-88. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000100011>.
- Carmona, L. C. e Berlatto, M. A. (2002). El Niño e La Niña e o rendimento de grãos de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 10, 147-152.
- Chang, J., Clay, D. E., Dalsted, K., Clay, S. e O'Neill, M. (2003). Corn (Zea mays L.) yield prediction using multispectral and multirate reflectance. *Agronomy Journal*, 95, 1447-1453. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2003.1447>.
- Chang, K. W., Shen, Y. e Lo, J. C. (2005). Predicting rice yield using canopy reflectance measured at booting stage. *Agronomy Journal*, 97, 872-878. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2004.0162>.
- Heinemann, A. B., Stone, L. F. e Silva, S. C. (2009). Arroz. In J. E. B. A. Monteiro (Ed.), *Agrometeorologia dos cultivos - o fator meteorológico na produção agrícola* (p. 65-79). Brasília: INMET.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015). Levantamento sistemático da produção agrícola; [acessado em 2015 Mar 12]. <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric>
- Jensen, J. R. (2009). Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese.
- Junges, A. H. e Fontana, D. C. (2011). Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. *Revista Ceres*, 58, 9-16. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2011000100002>.
- Klering, E. V., Fontana, D. C., Alves, R. C. M. e Berlatto, M. A. (2013). Estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado para o Rio Grande do Sul a partir de modelos agrometeorológicos-espectrais. In R. C. M. Alves e E. V. Klering (Orgs.), *Sensoriamento remoto aplicado à agrometeorologia: resultados do Projeto SIMTECO* (p. 79-102). Porto Alegre: Evangraf.
- Klering, E. V., Fontana, D. C., Berlatto, M. A. e Cargnelutti Filho, A. (2008). Modelagem agrometeorológica do rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 549-558. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2008000500001>.
- Liu, W. T. H. (2007). Previsão de safra agrícola. In W. T. H. Liu. *Aplicações de sensoriamento remoto* (p. 561-649). Campo Grande: Uniderp.
- Melo, R. W., Fontana, D. C., Berlatto, M. A. e Ducati, J. R. (2008). An agrometeorological-spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 4013-4028. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160701881905>.
- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (2003). Technical specifications; [acessado em 2014 Dez 26]. [modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html](http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html)
- Montgomery, D. C., Peck, E. A. e Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis*. New Jersey: John Wiley.
- Motohka, T., Nasahara, K. N., Miyata, A., Mano, M. e Tsuchida, S. (2009). Evaluation of optical satellite remote sensing for rice paddy phenology in monsoon Asia using a continuous in situ dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 4343-4357. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160802549369>.
- Motta, J. L. G., Fontana, D. C. e Weber, E. (2003). Evolução temporal do NDVI/NOAA em áreas cobertas por pixels com proporções variáveis de soja. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 11, 356-360.
- Rizzi, R. e Rudorff, B. F. T. (2005). Estimativa da área de soja no Rio Grande do Sul por meio de imagens Landsat. *Revista Brasileira de Cartografia*, 57, 226-234.
- Rizzi, R. e Rudorff, B. F. T. (2007). Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônomico para estimar a produtividade de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42, 73-80. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000100010>.
- Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N. e Ohno, H. (2005). A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96, 366-374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.008>.

Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado (2010). Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Porto Alegre: SOSBAI.

Souza, G. S. (1998). Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear. Brasília: EMBRAPA-SPI/EMBRAPA-SEA.

Steinmetz, S. e Amaral, A. G. (2002). Mapeamento do risco de frio durante o período reprodutivo do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado.

Steinmetz, S., Assis, F. N., Buriol, G. A., Estefanel, V., Didoné, I. A., Oliveira, H. T. e Simoneti, C. (2001). Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas do ar prejudiciais à fecundação das flores de arroz em distintas regiões produtoras do estado do Rio Grande do Sul. *Agropecuária Clima Temperado*, 4, 63-77.

Steinmetz, S., Matzenauer, R., Maluf, J. R. T. e Ferreira, J. S. A. (2009). Temperatura do solo favorável para o início da semeadura do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, 15, 99-104.