

Validade do modelo de eficiência do uso da radiação solar para estimativa de biomassa de cultivares de trigo sob estresse hídrico e nutricional

Bernardo Friedrich Theodor Rudorff¹
Mauricio Alves Moreira¹
José Guilherme de Freitas²
Marcelo dos Santos Targa³

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Av. dos Astronautas, 1.758 CEP 12.227-010 São José dos Campos - SP, Brasil
{bernardo, mauricio}@ltid.inpe.br

²Instituto Agronômico de Campinas – IAC
Av. Barão de Itapura, 1.481 CEP 13.001-970 Campinas - SP, Brasil
jfreitas@iac.sp.gov.br

³Universidade de Taubaté – UNITAU
Estr. Dr. José Luiz Cembranelli, 5.000 CEP 12081-010, Taubaté – SP, Brasil
mtarga@agro.unitau.br

Abstract. The radiation use efficiency (RUE) model is based on the linear relationship between accumulated absorbed photosynthetically active radiation (AAPAR) and above-ground biomass production (P). A constant parameter, representing de photosynthetic and respiratory processes, denoted as RUE is multiplied by AAPAR to estimate crop productivity. However, RUE may change significantly when crop is growing under environmental stress conditions, e.g. water or nutrient shortage. In the present study field remote sensing spectral reflectance measurements were used to estimate AAPAR for wheat during the seasons of 1999 and 2000 at the experimental farm of the University of Taubaté, São Paulo State, Brazil. Two wheat cultivars were grown under three soil water levels and four nitrogen levels in a split-split-plot design. Results showed that RUE varied significantly under water stress and between years. Therefore, RUE model seems to be of limited use to estimate biomass production in tropical field conditions where PAR is not a limiting growth factor.

Palavras-chave: remote sensing, photosynthetically active radiation, productivity model, sensoriamento remoto, radiação fotossinteticamente ativa, modelo de produtividade.

1. Introdução

A espectrorradiometria de campo é uma técnica de sensoriamento remoto que pode ser utilizada em experimentos agronômicos para obtenção de medidas da energia refletida, em diferentes faixas de comprimento de onda do espectro eletromagnético, a fim de estabelecer relações entre esta energia e alguns parâmetros biofísicos da vegetação (Henderson e Badhwar, 1984). A grande vantagem do sensoriamento remoto é que tais medidas podem ser realizadas tanto próximo à superfície, em pequenas áreas, quanto do espaço aéreo, para observação detalhada de grandes regiões. Os dados de sensoriamento remoto têm sido freqüentemente utilizados para estimativa de área de grandes culturas agrícolas e apresentam potencial para estimativa da produtividade por meio de modelos alimentados com parâmetros biofísicos estimados a partir destes dados (Bauer, 1985; Rizzi, 2004).

Entre estes modelos podemos citar o modelo de eficiência do uso da radiação, o qual estima a produção de biomassa (P) a partir da radiação solar fotossinteticamente ativa absorvida acumulada (RFAA_{acum}) pela cultura:

$$P = \varepsilon_B \text{RFAA}_{\text{acum}} \quad (1)$$

em que o parâmetro ε_B é a eficiência do uso da radiação (g MJ^{-1}) para produção de biomassa, representando os processos fotossintéticos e respiratórios da planta com valores constantes para uma mesma espécie (Monteith, 1977) ou cultura agrícola (Gallagher e Biscoe, 1978). A $\text{RFAA}_{\text{acum}}$ pode ser estimada a partir de dados de sensoriamento remoto em conjunto com dados de radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA em MJ m^{-2} ; 400 a 700 nm):

$$\text{RFA}_{\text{abs}} = f_A \text{RFA} \quad (2)$$

em que RFA_{abs} é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida e f_A é a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura, estimada a partir do modelo proposto por Asrar et al. (1984). Estes autores mostraram que existe uma boa correlação entre os valores do índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) e a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (f_A) e estabeleceram um modelo para a cultura do trigo:

$$f_A = -0,109 + 1,253 \text{NDVI} \quad (3)$$

O NDVI é estimado a partir da radiação refletida pela cultura (Tucker, 1979, Asrar et al., 1984; Daughtry et al., 1992; Rudorff et al., 1996; Moreira et al., 1999):

$$\text{NDVI} = (\text{IVP} - \text{VER}) / (\text{IVP} + \text{VER}) \quad (4)$$

em que IVP e VER é o valor da energia refletida pela cultura em faixas espectrais nas regiões do espectro eletromagnético do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente. Finalmente, a radiação fotossinteticamente ativa absorvida e acumulada ($\text{RFAA}_{\text{acum}}$), ao longo do ciclo da cultura é obtida através do somatório diário (entre 5 dias após emergência e a maturação fisiológica) dos valores de RFA_{abs} .

Apesar da simplicidade de se estimar a produção de biomassa a partir da radiação absorvida pela cultura, os valores da eficiência do uso da radiação (ε_B), obtidos empiricamente, não são constantes devido às limitações impostas ao crescimento por insuficiência de água, nutrientes e temperatura (Gower et al., 1999). Medlyn et al., (2003) cita o modelo de estimativa de produtividade sugerido por Landsberg (1986), que deve incluir fatores que descrevam o efeito limitante do meio ambiente ao crescimento:

$$P = \varepsilon_B f_A f_N f_T \text{RFAA}_{\text{acum}} \quad (5)$$

em que f_A , f_N e f_T representam os fatores limitantes ao crescimento devido a água, nutrientes e temperatura, respectivamente, e ε_B representa o valor máximo da eficiência do uso da radiação para uma cultura bem desenvolvida, na ausência de fatores limitantes à fotossíntese (Medlyn et al., 2003). Em condições de clima tropical a conversão da energia solar em energia química, no processo da fotossíntese, em geral não é limitada pela disponibilidade de radiação solar nem por temperaturas sub-ótimas, mas pela disponibilidade de água e nutrientes. Num ambiente de agricultura com adoção de tecnologia, o fator limitante primordial ao crescimento é a disponibilidade de água adequada para a cultura, que só pode ser suprida por meio de irrigação; prática pouco adotada na agricultura brasileira. Desta forma, a inclusão de um fator que considera a limitação ao crescimento devido à deficiência hídrica é de fundamental importância, uma vez que a eficiência do uso da radiação absorvida na estimativa da quantidade de biomassa produzida (Daughtry et al., 1992; Rudorff et al., 1997 e 2000) deve ser vista com cuidado, pois a radiação solar é apenas um dos diversos fatores envolvidos no processo produtivo e sob condições de campo dificilmente se apresenta como fator limitante (Demetriades-Shah et al., 1992). Considerando estes aspectos, o presente trabalho visa estabelecer um modelo de produtividade de biomassa do trigo a partir da radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada ao longo do ciclo da cultura em dois anos-safra, incluindo o efeito do estresse por água e por adubação nitrogenada.

2. Metodologia

2.1. Área de estudo e delineamento experimental

Dois experimentos a campo com a cultura do trigo, durante as entre-safras de 1999 e 2000 foram instalados na fazenda experimental da Universidade de Taubaté (UNITAU), Taubaté, São Paulo, em solo do tipo latossolo vermelho amarelo álico fase terraço. O delineamento estatístico utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema de parcelas sub sub-divididas, com 4 repetições. Os tratamentos de irrigação foram aplicados nas parcelas de trigo de acordo com o seguinte protocolo: 1) 100% da capacidade de campo; 2) 50% da capacidade de campo; e 3) 25% da capacidade de campo. A reposição da lâmina de água foi calculada segundo recomendações da CATI (1994). O sistema de irrigação foi instalado a cada ano logo após a semeadura e até o período de $\cong 40$ dias após emergência foi mantida a demanda evaporativa de 100% para todas as parcelas. A partir daí, as parcelas com 50 e 25% da capacidade de campo foram cobertas com lona plástica sobre estrutura de madeira durante os eventos de precipitação. O fertilizante nitrogenado utilizado foi a uréia, sendo aplicado nas sub-sub-parcelas na forma de quatro doses de nitrogênio (N) de 0, 60, 90 e 120 kg de N ha⁻¹. Um terço do N foi aplicado no sulco de semeadura e o restante no início do estágio de alongamento ($\cong 40$ dias após a emergência das plantas), segundo recomendação de Camargo et al. (1988). Nas sub-parcelas foram semeados os genótipos: IAC-24 e IAC-289 em 1º de maio de 1999 e 29 de abril de 2000. A semeadura foi realizada através da semeadora de parcela de trigo do Centro de Plantas Graníferas do Instituto Agrônomo de Campinas. O espaçamento foi de 17 cm entre linhas com aproximadamente 80 sementes viáveis por metro linear. Não foi necessária a aplicação de defensivos agrícolas. No levantamento da física do solo foi verificado que não havia a necessidade de se realizar uma subsolagem.

2.2. Medidas radiométricas e índice vegetativo

As medidas de radiometria de campo foram realizadas semanalmente ou conforme as condições meteorológicas permitiram, ao longo do ciclo da cultura. Foi utilizado um espectrorradiômetro portátil de campo denominado SPECTRON SE-590 (Spectron Inc., EUA), fixado num mastro a cerca de 3m acima do dossel da cultura, com um ângulo de visada de 15º que permitiu obter a radiância de uma superfície de aproximadamente 0,5 m² (Moreira, et al., 1999). As medidas espectrorradiométricas foram realizadas em 9 datas em 1999 e em 13 datas em 2000. As medidas obtidas com o SPECTRON SE-590 em 255 bandas espectrais, compreendidas entre a faixa espectral de 400 a 1.100 nm, foram transformadas em fator de reflectância, seguindo a metodologia proposta por Steffen (1996). Posteriormente, os valores do fator de reflectância nas faixas espectrais correspondentes a banda 3(vermelho) (630 a 690 nm) e a banda 4 (infravermelho próximo) do sensor TM do satélite Landsat (760 a 900 nm) foram utilizados para o cálculo do NDVI (Tucker, 1979) uma vez que estas bandas são amplamente utilizadas nas aplicações do sensoriamento remoto na agricultura.

2.3. Radiação fotossinteticamente ativa absorvida e eficiência do uso da radiação

A fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (f_A) foi estimada pela Equação 3, onde os valores de NDVI foram interpolados de forma linear para obtenção de valores diários (Daughtry et al., 1992; Rudorff et al., 1996; Moreira et al., 1999) desde o período da emergência, para o qual foi estipulado o valor de NDVI igual a 0,15 (solo exposto), até a maturação fisiológica das plantas, quando as plantas estão amareladas e o NDVI atinge o valor de 0,5 (Rudorff e Batista, 1991). Com os valores diários da f_A e da radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA), foi estimada a RFA_{abs} utilizando a Equação 2. A

RFA (em MJ m⁻²; 400 a 700 nm) foi medida na Estação Meteorológica Automática de Pindamonhangaba, SP do Instituto Agrônomo de Campinas. Pindamonhangaba é um município vizinho a Taubaté com mesmo clima e considerando que a radiação solar varia pouco entre estes dois locais (Estação Meteorológica e área do experimento) assumiu-se que os valores de RFA de Pindamonhangaba são similares aos de Taubaté, uma vez que a correlação entre o número de horas de insolação da Estação Meteorológica de Pindamonhangaba e o número de horas de insolação da Estação Meteorológica de Taubaté apresentou um coeficiente de $r=0,91$ para o período da entre-safra do ano de 2000. Por último, a radiação fotossinteticamente ativa absorvida e acumulada (RFAA_{acum}) ao longo do ciclo da cultura foi obtida através do somatório diário (entre 5 dias após emergência e a maturação fisiológica) dos valores de RFA_{abs}.

A eficiência do uso da radiação (g MJ⁻¹) para produção de biomassa (ϵ_B) foi obtida pela razão entre o peso da biomassa (B) com a RFAA_{acum} ao longo do ciclo da cultura. Deve-se enfatizar que o ciclo de duração da cultura foi estipulado para o período compreendido entre a emergência (mesmo dia para todas as sub sub-parcelas) e a maturação fisiológica, que é atingida quando o valor do NDVI é igual a 0,5 (Rudorff e Batista, 1991). O número de dias para atingir a maturação fisiológica deve variar de acordo com as condições estabelecidas segundo o protocolo experimental a que cada sub sub-parcela foi submetida.

Os dados de RFAA_{acum}, ϵ_B e de biomassa foram analisados utilizando procedimentos de análise de regressão e análise de variância adequados para um delineamento experimental em blocos com sub sub-parcelas. As diferenças entre tratamentos foram avaliadas através do teste estatístico de Duncan.

3.1. Resultados e discussões

As **Tabelas 1 e 2** apresentam a análise de variância para radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada (RFAA_{acum}), biomassa aérea, eficiência do uso da radiação para produção de biomassa (ϵ_B) e número de dias do ciclo (NC) para os anos safra 1999 e 2000, respectivamente. Nota-se nestas tabelas que as interações dos fatores irrigação, cultivar e nitrogênio não foram significativas ($\alpha \leq 0,05$), exceto a interação irrigação vs. nitrogênio para produção de biomassa e ϵ_B no ano de 1999, indicando que a adubação nitrogenada foi mais eficaz quando a cultura não estava sob estresse hídrico. Em condições de deficiência hídrica a adsorção do nitrogênio é dificultada (Kudrev, 1994) e o fator nitrogênio apresenta menor resposta. Nota-se também que não houve diferença significativa entre os cultivares IAC-24 e IAC-289, exceto em termos do número de dias do ciclo em 1999, que foi de 94,3 e 91,6 dias para os cultivares IAC-24 e IAC-289, respectivamente. Já o fator irrigação foi altamente significativo para todos os parâmetros em ambos os anos analisados. O fator nitrogênio só não foi significativo para produção de biomassa e ϵ_B , na safra 2000. A ANOVA conjunta para os dois anos safra mostrou que existe uma diferença significativa entre eles; optou-se, portanto, por analisá-los separadamente.

Durante as estações de crescimento do trigo as temperaturas médias máximas e mínimas foram de 11,0 °C e 26,3 °C em 1999 e de 8,8 °C e 27,6 °C em 2000, respectivamente. Isto indica que os anos foram muito semelhantes entre si no que se refere à temperatura. A principal diferença observada entre os anos foi a disponibilidade de água, conforme pode ser observado na **Figura 1** (a e b), a qual apresenta a síntese do balanço hídrico para 1999 e 2000, respectivamente. A maior disponibilidade de água para a cultura em 2000 aumentou a duração do ciclo da cultura e fez com que a mesma absorvesse maior quantidade de RFA ao longo da

estação de crescimento, aumentando também a produção de biomassa. Outro aspecto a ser observado é que não houve diferença significativa entre os tratamentos de irrigação de 50% e 25% da capacidade de campo em 2000, para nenhum dos parâmetros agrônômicos. Isto pode ser atribuído à dificuldade de repor adequadamente a água segundo o protocolo experimental, já que na **Figura 1b** verificamos uma grande semelhança para o balanço hídrico desses dois tratamentos.

A partir dos resultados da ϵ_B apresentados nas **Tabelas 1 e 2**, verificamos que o estresse hídrico reduziu a eficiência do uso da radiação. Além disso, ela foi diferente em cada ano mesmo para as parcelas sem deficiência hídrica e nutricional. Pelos dados deste experimento o fator de correção hídrica (f_A ; Equação 5) variou de aproximadamente 0,50 a 0,70 para as parcelas submetidas ao estresse hídrico. Enquanto que o fator de correção nutricional (f_N ; Equação 5) foi de aproximadamente 0,85 em 1999. Em 2000 o fator nitrogênio não teve efeito sobre a ϵ_B .

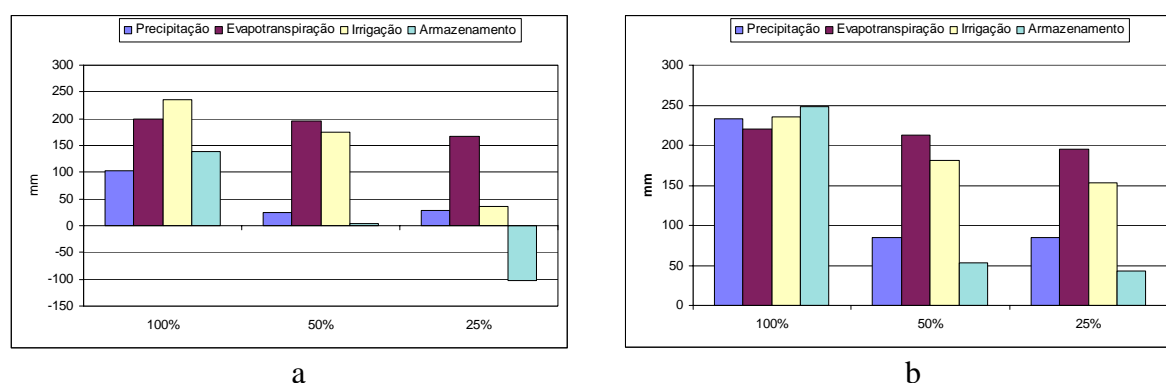


Figura 1 – Síntese do balanço hídrico para os três tratamentos de irrigação (100%, 50% e 25% da capacidade de campo) na entre safra de 1999 (a) e de 2000 (b).

Moreira et al. (2004) realizaram um experimento nessa mesma área de estudo em 1999 com 20 genótipos de trigo e observaram que os cultivares IAC-24 e IAC-289 tiveram valor de ϵ_B de $2,3 \text{ g MJ}^{-1}$. No presente experimento tais cultivares (em condições semelhantes de manejo) tiveram valores de $1,96$ e $1,65 \text{ g MJ}^{-1}$ em 1999 e 2000, respectivamente. Apesar disso, os valores de $RFAA_{acum}$ foram muito semelhantes, o que indica que para uma mesma $RFAA_{acum}$ os cultivares tiveram maior produção de biomassa no experimento de Moreira et al. (2004). Certamente esta variação nos valores de ϵ_B conflita com a afirmação de Montieth (1977) de que a ϵ_B é constante para uma mesma espécie e concorda com os dados de Moreira et al. (2004), onde a ϵ_B variou de $1,85$ a $2,66 \text{ g MJ}^{-1}$ para 20 genótipos de trigo.

Isto mostra que o estabelecimento de um modelo de estimativa de produção de biomassa a partir dos valores de $RFAA_{acum}$ e do conhecimento da eficiência com que esta radiação é convertida em fotoassimilados não é tarefa fácil. Incluir fatores de correção conforme citado em Medlyn et al. (2003) pode ser uma alternativa. Entretanto, observamos que o fator hídrico variou de 0,5 a 0,7 para as parcelas de trigo que cresceram sob condição hídrica de 50 e 25% da capacidade de campo. Parece ser difícil estipular, de forma padronizada, valores para um fator hídrico num modelo de radiação (Equação 5), especialmente quando se trata de estimar biomassa de culturas agrícolas. Por exemplo, cerca de 50% da biomassa seca do trigo é composta por grãos cujo peso é fortemente afetado quando ocorre uma deficiência hídrica em estádios fenológicos específicos, como florescimento e enchimento de grãos. A disponibilidade de água e nutrientes é muito mais relevante na definição da produtividade e

na duração do ciclo da cultura. A cultura sob estresse tende a diminuir tanto a produção de biomassa quanto a duração do ciclo e evidentemente absorve menos radiação, mas isto não significa que a radiação é fator limitante na produção de biomassa.

Tabela 1 - Efeitos dos fatores irrigação, cultivar e nitrogênio sobre parâmetros agronômicos e biofísicos da cultura do trigo no ano de 1999

FATORES			PARÂMETROS AGRONÔMICOS E BIOFÍSICOS			
			Biomassa g m ⁻²	AAPAR MJ m ⁻²	ε _B g MJ ⁻¹	N ^o dias do ciclo
<u>Irrigação</u>	<u>Cultivar</u>	<u>Nitrogênio</u>				
100%	-	-	785,1 a	415,1 a	1,91 a	98,3 a
50%	-	-	468,9 b	386,9 a	1,20 b	94,7 a
25%	-	-	342,4 c	333,2 b	1,02 b	85,9 b
-	IAC-24	-	535,6	385,4	1,38	94,3 a
-	IAC-289	-	507,9	371,5	1,33	91,6 b
-	-	0 kg ha ⁻¹	458,4 c	364,5 b	1,25 c	91,3 b
-	-	60 kg ha ⁻¹	511,8 b	377,8 b	1,32 bc	93,1 b
-	-	90 kg ha ⁻¹	527,0 b	374,7 b	1,37 b	92,0 b
-	-	120kg ha ⁻¹	587,4 a	396,7 a	1,47 a	95,5 a
			<u>Análise de variância, valores de F</u>			
Irrigação			43,1 **	14,5 **	54,0 **	22,5 **
Cultivar			4,2 NS	1,9 NS	5,1 *	5,6 *
Nitrogênio			14,4 **	6,4 **	10,7 **	5,3 **
Irrigação x Cultivar			1,5 NS	0,8 NS	3,4 NS	1,0 NS
Irrigação x Nitrogênio			5,2 **	0,2 NS	5,4 **	1,1 NS
Cultivar x Nitrogênio			1,5 NS	0,3 NS	1,6 NS	1,8 NS
Irrigação x Cultivar x Nitrogênio			0,4 NS	0,7 NS	0,4 NS	0,6 NS
Coeficiente de Variação, %			12,9	6,9	10,0	4,2

NS, não significativo ao nível de $P \leq 0,05$; *, **, significativo aos níveis de 0,05 e 0,01, respectivamente. Médias com letras iguais não diferem significativamente ao nível de 5% pelo teste de Duncan.

As medidas de sensoriamento remoto levam em conta o efeito coletivo dos diversos fatores ambientais expressos na energia refletida pela cultura, representada neste trabalho pelo NDVI. Contudo, essa energia reflete apenas parte do efeito ambiental. Por exemplo, uma cultura de milho pode estar aparentemente verde, mas uma deficiência hídrica na floração pode causar uma drástica redução na produção de biomassa e de grãos. Parece que alguns fatores intimamente ligados à produtividade não se manifestam na reflectância dos dosséis agrícolas ou não são perceptíveis pelos dados de sensoriamento remoto até então utilizados. Além disso, a radiação solar dificilmente se apresenta como fator limitante ao crescimento em condições de campo em regiões tropicais (Demetriades-Shah et al., 1992).

Portanto, a real utilidade do modelo de radiação para estimar produção de biomassa de culturas agrícolas deve ser questionada e vista com cuidado. A $RFAA_{acum}$ não é uma variável relevante na produção de fitomassa e não pode ser considerada de forma isolada (Nouvellon et al., 2000). A grande vantagem dos dados de sensoriamento remoto reside no fato de obter informação espacial detalhada e de forma repetitiva para grandes regiões. Neste sentido, o uso desses dados para estimar um parâmetro agrônomico, como o índice de área foliar, e introduzi-lo num modelo de estimativa de produção que considera também variáveis meteorológicas, é bem mais promissor (Rizzi, 2004).

Tabela 2 - Efeitos dos fatores irrigação, cultivar e nitrogênio sobre parâmetros agrônômicos e biofísicos da cultura do trigo no ano de 2000

FATORES		PARÂMETROS AGRONÔMICOS E BIOFÍSICOS				
		Biomassa g m ⁻²	AAPAR MJ m ⁻²	ϵ_B g MJ ⁻¹	N ^o dias do ciclo	
Irrigação	Cultivar	Nitrogênio				
100%	-	-	813,0 a	491,0 a	1,66 a	105,9 a
50%	-	-	534,6 b	425,8 b	1,26 b	96,6 b
25%	-	-	513,6 b	413,0 b	1,25 b	94,9 b
-	IAC-24	-	626,9	435,2	1,43	97,3
-	IAC-289	-	613,9	451,3	1,35	101,1
-	-	0 kg ha ⁻¹	605,5	420,8 b	1,43	95,9 b
-	-	60 kg ha ⁻¹	627,6	442,3 a	1,41	99,2 a
-	-	90 kg ha ⁻¹	614,4	459,2 a	1,32	101,0 a
-	-	120kg ha ⁻¹	634,0	450,8 a	1,40	100,5 a
			<u>Análise de variância, valores de F</u>			
Irrigação			41,3 **	21,3 **	16,9 **	24,7 **
Cultivar			0,4 NS	1,1 NS	4,3 NS	3,6 NS
Nitrogênio			0,5 NS	7,7 **	1,5 NS	4,7 **
Irrigação x Cultivar			0,9 NS	0,2 NS	1,3 NS	0,5 NS
Irrigação x Nitrogênio			0,4 NS	0,4 NS	0,8 NS	0,2 NS
Cultivar x Nitrogênio			1,0 NS	0,4 NS	1,7 NS	0,8 NS
IrrigaçãoxCultivarxNitrogênio			0,3 NS	1,9 NS	0,4 NS	1,1 NS
Coeficiente de Variação, %			13,8	9,5	13,2	5,2

NS, não significativo ao nível de $P \leq 0,05$; *, **, significativo aos níveis de 0,05 e 0,01, respectivamente. Médias com letras iguais não diferem significativamente ao nível de 5% pelo teste de Duncan.

4. Referências bibliográficas

- Asrar, G.; M. Fuchs; E.T. Kanemasu; J.L. Hatfield. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, 76:300-306.
- Bauer, M.E. 1985. Spectral inputs to crop identification and condition assessment. **In Proceedings of the IEEE**, 73(6):1071-1085.
- Camargo, C.E.O.; J.C. Felício; A. Petinelli Jr.; L. S Rocha Jr. 1988. **Adubação nitrogenada em cultura do trigo irrigado por aspersão no estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônomico, (Boletim científico, 15). 26 p.
- CATI - Coordenadoria de Assistência Técnica Integral. 1994. **Recomendações da comissão técnica de trigo para 1994**. Campinas, (Boletim 216). 74 p.

- Daughtry, C.S.T.; K.P. Gallo; S.N. Goward; S.D. Price; W.P. Kustas. 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. **Remote Sensing of Environment**, 39:141-152.
- Demetriades-Shah, T.D.; M. Fuchs; E.T. Kanemasu; I. Flitcroft. 1992. A note of caution concerning the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. **Agricultural and Forestry Meteorology**, 58:193-207.
- Gallagher, J.N.; Biscoe, P.V. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. **Journal of Agricultural Science**, 91:47-60.
- Gower, S.T.; Kucharik, C.J.; Norman, J.M. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{APAR} , and net primary production of terrestrial ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, 70:29-51.
- Henderson, K. E.; G.D. Badhwar. 1984. An initial model for estimating soybean development stages from spectral data. **Remote Sensing of Environment**, 14:55-63.
- Kudrev, T.G. **Água: vida das plantas**. São Paulo: Ícone, 1994. 178 p.
- Medlyn, B.; Barrett, D.; Landsberg, J.; Sands, P.; Clement, R. 2003. Conversion of canopy intercepted radiation to photosynthate: review of modeling approaches for regional scales. **Functional Plant Biology**, 30:153-169.
- Monteith, J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Transaction of the Royal Society of London Series B**, 281: 277-294.
- Moreira, M.A.; Rudorff, B.F.T., Felício, J.C.; Freitas J.G.; Targa, M.S. 2004. Variação espectral e eficiência do uso da radiação em ensaio com genótipos de trigo. **Bragantia**, no prelo.
- Moreira, M.A; Angulo Filho, R.; Rudorff, B.F.T. 1999. Eficiência do uso da radiação e índice de colheita em trigo submetido a estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento. **Scientia Agrícola**. Piracicaba, SP. 56(3):597-603.
- Nouvellon, Y., Seen, D.L., Rambal, S., Béngué, A., Moran, S.M., Kerr, Y., Qi, J. 2000. Time course of radiation use efficiency in a shortgrass ecosystem: consequences for remotely sensed estimation of primary production. **Remote Sensing of Environment**, 71:43-55.
- Rizzi, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004-04-30. (INPE--TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004.
- Rudorff, B.F.T., Batista, G.T. 1991. Wheat yield estimation at the farm level using Landsat TM and agrometeorological data. **International Journal of Remote Sensing**, 12:2477-2484.
- Rudorff, B.F.T.; C.L. Mulchi; C.S.T. Daughtry; E.H. Lee. 1996. Growth, radiation use efficiency, and canopy reflectance of wheat and corn grown under elevated ozone and carbon dioxide atmospheres. **Remote Sensing of Environment**, 55:163-173.
- Rudorff, B.F.T.; Moreira, M.A.; Oviedo, A.F.P.; Freitas, J.G. 1997. Efeito do nitrogênio e do déficit hídrico na resposta espectral de cultivares de trigo. Memórias del VIII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Mérida, Venezuela, 2-7 nov. 1997. **Anais CD-ROM**, 9p.
- Rudorff, B.F.T.; Moreira, M.A.; Targa, M.S.; Freitas, J.G. 2000. Espectrorradiometria de campo em trigo e sua relação com parâmetros agronômicos. Memórias del IX Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Iguazú, Argentina, 6-10 nov. 2000. **Anais CD-ROM**, 11p.
- Steffen, C.A. 1996. Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador, 1996. **Anais**. INPE/SELPER, p. 9-14.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 8(2):127-150.