

ISSN 0104-1347

Eficiências de interceptação, absorção e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas e verificação do modelo energético de estimativa da massa seca acumulada¹

Efficiency of interception, absorption, and photosynthetically active radiation use in maize crops (*Zea mays* L.) submitted to different water conditions and dry matter estimation by energetic model

Artur Gustavo Müller² e Homero Bergamaschi³

Resumo - Os componentes do balanço de radiação fotossinteticamente ativa em uma cultura de milho foram medidos em parcelas irrigadas e não-irrigadas, visando ao ajuste do modelo energético de estimativa da massa seca, em Eldorado do Sul, Brasil (30° 05' S de lat., 51° 40' O de long., 40m de alt), durante o verão de 1998/99. O coeficiente de extinção foi ajustado em função das estimativas de eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e do índice de área foliar estimado diariamente. A eficiência de uso foi estimada para todo o período pelo ajuste da massa seca aérea acumulada a uma função linear da radiação fotossinteticamente ativa interceptada. O modelo de estimativa do potencial de acúmulo de biomassa aérea pela cultura, baseado no conceito de balanço energético, mostra-se adequado, contudo a ocorrência de restrição hídrica causa a diminuição da eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada ou absorvida. Se a restrição hídrica ocorrer no período de crescimento da cultura, afeta o índice de área foliar e, conseqüentemente, a eficiência de interceptação e de absorção da radiação fotossinteticamente ativa incidente.

Palavras-chave: radiação solar, área foliar, eficiência de uso de PAR, *Zea mays*.

Abstract - Components of the balances of photosynthetically active radiation (PAR) were measured in irrigated and non-irrigated maize plots, in a field experiment carried out at the Agronomic Experimental Station of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul, in Eldorado do Sul, Brazil (30°05' S lat., 51°40' W long., 40m alt.), during the summer season of 1998/99. The extinction coefficient was adjusted in a daily basis as function of the efficiency of PAR interception (e_i) and of the leaf area index (LAI). The efficient use of intercepted PAR (e_{use}) was estimated for the entire crop cycle, by modeling the accumulated aerial dry matter of plants as function of the intercepted PAR. This model was verified through data of accumulated aerial dry matter weigh of plants, taken from five experiments conducted in the same place, from 1993/94 to 1997/98. This procedure was based on the concept of energetic balance, which showed to be appropriate in estimating the potential production of aerial biomass in maize crops. The occurrence of water deficit causes a decrease of e_{use} . Water constraints may affect also LAI, and hence the efficiencies of PAR interception (e_i) and absorption (e_a), if it occurs during the period of plant growth.

Key words: solar radiation, leaf area, PAR use efficiency, *Zea mays*.

¹Parte da tese de doutorado do primeiro autor no PPG Fitotecnia, área de concentração Agrometeorologia, UFRGS. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

²Engº Agrº, Professor da UNIJUÍ, Ijuí, RS. Email agmuller@main.unijui.tche.br.

³Engº Agrº, doutor, Professor da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Porto Alegre, RS. Bolsista do CNPq.

Introdução

Os potenciais de crescimento e rendimento das culturas são características genéticas das plantas, que podem não ser expressos devido a limitações do meio. O potencial do meio é determinado, fundamentalmente, pela oferta de radiação solar e pela capacidade das plantas em captar e converter essa energia primária em compostos orgânicos ao nas folhas e realocá-los nos órgãos de interesse agrícola. Outros fatores do meio, tais como temperatura, disponibilidades de água e de nutrientes no solo atuam como limitantes à expressão desses potenciais. Desta forma os modelos potenciais de cultura são baseados na avaliação das eficiências de interceptação e absorção da radiação solar incidente e da transformação dessas parcelas de energia em matéria seca acumulada na parte aérea. Os efeitos limitantes dos demais fatores do meio são estimados por relações do rendimento relativo com a oferta relativa. Neste trabalho, teve-se por objetivo: I) ajustar modelos matemáticos relacionando a eficiência de interceptação (ϵ_i) e a eficiência de absorção (ϵ_a) de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) com o índice de área foliar de uma cultura de milho, bem como a eficiência de uso (ϵ_{uso}) com a RFA interceptada e absorvida pela cultura e, II) verificar o efeito de restrições hídricas sobre esses coeficientes. A partir desses ajustes torna-se possível estimar a quantidade de RFA interceptada e absorvida pela cultura, em função da evolução da área foliar durante o ciclo da cultura e estimar a produção de biomassa, parâmetro utilizado em modelos de estimativa de rendimento de grãos.

Material e Métodos

Os experimentos foram conduzidos na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS, localizada no Município de Eldorado do Sul (latitude 30°05'22"S, longitude 51°39'08"W, altitude 40 metros), na região ecoclimática da Depressão Central do Rio Grande do Sul, nos anos agrícolas de 1993/94 a 1998/99.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo fundamental Cfa, ou seja, subtropical úmido de verão quente. A precipitação média anual é de 1440 mm, com 425 mm concentrados nos meses de novembro a fevereiro, que abrange o período experimental, da emergência à maturação fisiológica do milho. O total de evapotranspiração de

referência média anual é de 1235 mm, sendo 583 mm nos meses de novembro a fevereiro. Ocorrem variações nas médias mensais de radiação solar, mas o mês de maior fluxo de radiação global é dezembro, com média de 26,0 MJ m² dia⁻¹ (BERGAMASCHI & GUADAGNIN, 1990).

O relevo da área experimental é plano e o solo é classificado como podzólico vermelho amarelo, caracterizado por um gradiente textural gradual ao longo do perfil, mas com a presença de um horizonte B textural (Bt), identificado pela ocorrência de cerosidade e relação textural em alguns locais (LEGUIZAMÓN ROJAS, 1998).

Para a realização do experimento, utilizou-se um híbrido precoce Pioneer 3063, semeado em 22/10/98, em linhas espaçadas de 0,75m e densidade de 66.670 plantas.ha⁻¹. Em anos anteriores, cujos resultados serviram para a aferição de modelos, a semeadura foi feita no final de outubro ou início de novembro. Por meio de um sistema de aspersão em duas linhas, foram aplicados diferentes níveis de irrigação, sendo utilizados, para este estudo, os dois tratamentos extremos: I5 com solo mantido acima do potencial hídrico de capacidade de campo e I0 sem irrigação.

A medição da radiação fotossinteticamente ativa foi feita por conjuntos de sensores montados em barras de alumínio, contendo de cinco a sete células de silício amorfo, acoplados a um sistema "datalogger" Campbell CR10, com registro, a cada 15 minutos, dos componentes: radiação incidente, refletida pela cultura, transmitida em nível do solo e refletida pelo solo. A partir de totais diários de cada componente, calcularam-se os totais de RFA interceptada e absorvida pela cultura que, divididos pelo total incidente, resultaram na eficiência de interceptação da RFA_{inc.} (ϵ_i) e na eficiência de absorção da RFA_{inc.} (ϵ_a).

Foi calculada a parcela da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura (RFA_{int}) pela fórmula:

$$RFA_{int} = RFA_{inc} - RFA_t \quad (1)$$

sendo RFA_{inc} a radiação incidente e RFA_t a radiação transmitida pelo dossel de plantas até o nível do solo.

A parcela da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura (RFA_a) foi calculada por:

$$RFA_a = RFA_{inc} + RFA_{rs} - RFA_{rsc} - RFA_t \quad (2)$$

sendo RFA_{rs} a radiação refletida pelo solo e RFA_{rsc} a radiação refletida pela a cultura.

O coeficiente de extinção é o coeficiente angular da relação linear existente entre o índice de área foliar (IAF) e o termo $[\ln(1-\varepsilon_{int})]$, obtido da equação da transmissividade. Este coeficiente foi obtido a partir de dados diários de ε_{int} e de IAF.

A máxima eficiência de uso da RFA_{int} foi obtida a partir da equação linear entre a matéria seca acumulada após a quarta folha expandida e a RFA_{int} acumulada no período. O coeficiente de inclinação da reta é a máxima eficiência de uso da RFA_{int} .

O acompanhamento do acúmulo de peso da matéria seca da parte aérea do milho e de sua repartição em colmo, folhas verdes, estigmas, sabugo, palha, grãos e tecidos senescentes foi realizado semanalmente em amostragens de quatro plantas por parcela.

O índice de área foliar foi estimado a partir das mesmas amostras, calculado de acordo com a seguinte equação:

$$IAF = \frac{AF}{S} \quad (3)$$

em que AF é a área foliar, calculada por meio da multiplicação do peso da matéria seca das folhas de quatro plantas pela área foliar específica média do tratamento, e S a área do terreno amostrado (0,6 m² para quatro plantas).

A área foliar específica, para cada parcela, foi determinada pela divisão da área de folhas de uma planta, medida em planímetro eletrônico (modelo LI 3000), pelo seu respectivo peso da matéria seca.

A partir dos coeficientes estimados, para as condições sem estresse hídrico, foi verificada a validade do uso do modelo energético para a estimativa do potencial de acúmulo de massa seca aérea (equação 4) pela cultura do milho na região.

$$MS_{acum} = Rg \cdot 0,42 \cdot \varepsilon_{int} \cdot \varepsilon_{abs} \cdot \varepsilon_{uso} \quad (4)$$

sendo: MS_{acum} a massa seca aérea acumulada; Rg a radiação solar global incidente; ε_{int} , a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa incidente; ε_{abs} , a eficiência de absorção da radiação fotossinteticamente ativa interceptada, ε_{uso} a eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa absorvida.

A verificação da validade do modelo foi realizada pela avaliação da precisão das estimativas. Para assegurar a independência dos dados, foram utiliza-

dos resultados de anos que não participaram do ajuste dos respectivos coeficientes dos modelos.

Na verificação da precisão das estimativas, os erros de estimativa foram decompostos em erro de predição, erro da regressão e erro aleatório.

A significância do erro de predição foi testada contrastando a estimativa de F com a distribuição normal de F, para 1 e (n-1) graus de liberdade. A estimativa de F foi obtida pela equação:

$$F_{(1,n-1)} = \frac{(\bar{Y}_{est} - \bar{Y}_{obs})^2}{s_{est}^2 + s_{obs}^2 - 2s_{corr}} \quad (5)$$

em que \square é a média da massa seca aérea estimada pelo modelo; \square é a média de massa seca aérea observada; \square é a variância dos valores estimados; \square é a variância dos valores observados e \square é a covariância entre os valores observados e estimados.

A significância do erro devido à regressão foi verificada testando se o coeficiente angular (b), da relação entre os resultados estimados e observados, diferencia-se de 1. O teste consiste do contraste da estimativa do valor t com a distribuição normal de t para n-2 graus de liberdade. A estimativa de t foi obtida pela equação:

$$t = \frac{b-1}{S_b} \quad (6)$$

sendo S_b o desvio padrão da estimativa do coeficiente angular (b).

Resultados e discussão

Em condições irrigadas, o coeficiente de extinção estimado pelo coeficiente de regressão linear entre o índice de área foliar e o termo $[\ln(1-\varepsilon_{int})]$, obtido da equação da transmissividade, foi de 0,68 (Figura 1), sendo próximo a 0,7, encontrado por GOSSE (1986). Em relação aos coeficientes de extinção estimados a partir da eficiência de absorção, situa-se no limite inferior do intervalo estimado por VARLET-GRANCHER et al. (1982) de 0,68 a 0,73 e é superior aos estimados por MONTHEITH (1996) e por GALLO & DAUGHTRY (1986), de 0,65 e 0,66,

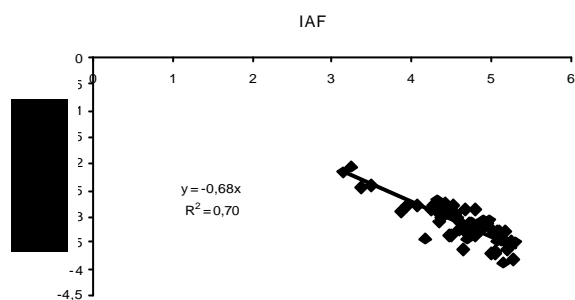


Figura 1. Relação entre $\ln(1-\epsilon_{int})$ e o índice de área foliar (IAF) em milho irrigado (Pionner 3063), sendo o coeficiente de extinção igual ao módulo ao coeficiente de regressão. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 1998/99.

respectivamente.

Os fatores que causam redução do coeficiente de extinção são: a menor eficiência de interceptação de híbridos devido às suas características de folhas mais eretas e de menor tamanho que reduzem a capacidade de interceptar a radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA_{inc}) entre as suas camadas de folhas; a densidade populacional e/ou distância, entre linhas, não bem ajustadas para o híbrido e as condições do meio; o ângulo zenital da radiação solar, que é menor durante o verão, diminui a eficiência de interceptação, pois permite que uma maior parcela da radiação incidente seja transmitida através do dossel de folhas.

Em condições de cultura não irrigada o valor do coeficiente de extinção estimado para o milho foi extremamente variável em função de outros fatores que não apenas o IAF, não se ajustando a uma equação de reta. Esta variabilidade pode ser atribuída ao enrolamento das folhas, quando a população de plantas estava submetida a condições de deficiência hídrica, diminuindo desta forma a área foliar exposta à radiação solar e aumentando a radiação transmitida pelo dossel da cultura.

No tratamento irrigado e em índices de área foliar maiores do que 2,7, a eficiência de interceptação da RFA apresentou aumentos decrescentes com o crescimento da área foliar, chegando próximo de sua eficiência máxima (0,98) nos maiores IAF observados (Figura 2). Essa relação se ajusta bem ao modelo de interceptação da radiação proposto originalmente por MONSI & SAEKI (1953) e modificado e utilizado por diversos autores, como BONHOMME et al.

(1982); GOSSE et al. (1986); RUSSEL et al. (1989).

Para a situação da população de plantas submetida a condições de deficiência hídrica ocorreu uma dispersão dos valores de eficiência de interceptação da RFA. Essa dispersão ocorreu praticamente durante todo o período, pois, além de ser provocada pela gradual redução da disponibilidade de água no solo e conseqüente menor fluxo de absorção, a deficiência hídrica também é dependente do fluxo de saída de água (transpiração). Portanto, quando as condições meteorológicas e da cultura demandarem um fluxo transpiratório maior do que a capacidade de absorção, a população de plantas entra em deficiência hídrica. Dessa forma, a grande variação de evapotranspiração, entre os dias, pode determinar variações nos níveis de deficiência hídrica, mesmo que as condições hídricas do solo estejam em condições semelhantes, provocando o enrolamento das folhas e, conseqüentemente, diminuindo a eficiência de interceptação da radiação incidente.

A parcela da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{int}), que foi absorvida pela planta, mostrou-se constante e independente das condições hídricas em que as plantas se encontravam (Figura 3). Neste experimento, a parcela de RFA interceptada que não foi absorvida pelo dossel da cultura de milho foi de 7,6 %. Esse coeficiente está dentro da faixa estimada por VARLET-GRANCHER (1989), segundo o qual menos de 10 % da RFA_{int} não é absorvida, mas superior aos valores encontrados por GALLO & DAUGHTRY (1986) e de HAMMER & VANDERLIP (1989), que obtiveram percentuais de 3,5 % e entre 2 e 5 %, respectivamente.

O maior percentual encontrado neste

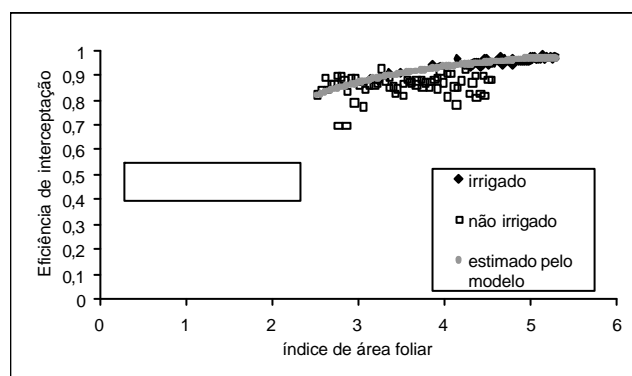


Figura 2 Eficiência de interceptação observada em milho (Pionner 3063), irrigado e não-irrigado e estimada em função do índice de área foliar. EEA/Eldorado do Sul, RS, 1998/99.

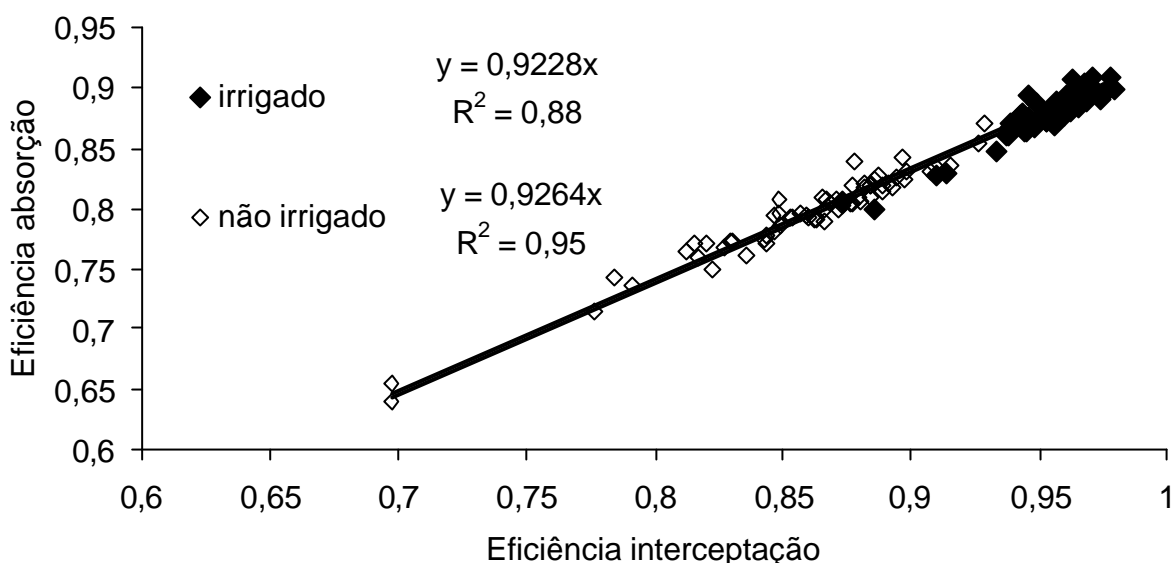


Figura 3. Relação entre a eficiência de absorção e a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa no milho (Pioneer 3063), irrigado e não irrigado. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul. 1998/99.

experimento pode ser explicado pelos fatores que afetam este coeficiente e que incluem características do solo (como albedo), da planta (como a distribuição das folhas e caules e sua capacidade assimilatória) e da inclinação média da radiação solar durante o dia.

Além da exatidão, a consistência do coeficiente pode ser comprovada pela sua constância em diferentes níveis de RFA_{int} , bem como pela semelhança entre os coeficientes obtidos em condições irrigadas (0,9264) e não-irrigadas (0,9228), porém esses não diferem entre si em um nível de 1 % de significância.

Essa relação constante entre a eficiência de interceptação (ϵ_{int}) e de absorção (ϵ_{abs}) da radiação fotossinteticamente ativa permite que seja possível a estimativa de uma destas mediante o conhecimento da outra isolando a variável desconhecida na equação:

$$\epsilon_{abs} = 0,925 \cdot \epsilon_{int} \quad (7)$$

Da mesma forma o coeficiente permite também obter a relação entre as eficiências de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada ($\epsilon_{uso} RFA_{int}$) e absorvida ($\epsilon_{uso} RFA_{abs}$).

$$\epsilon_{uso} RFA_{abs} = \epsilon_{uso} RFA_{int} / 0,925 \quad (8)$$

A eficiência de uso da radiação solar

fotossinteticamente ativa interceptada pelo milho irrigado, durante os períodos de rápido crescimento, florescimento e parte do enchimento de grãos, em que as folhas mantinham sua capacidade fotossintética, foi de $3,58 \text{ g MJ}^{-1}$ de RFA_{int} , como pode ser observado na Figura 4.

A relação mostrou-se bastante consistente, com um erro padrão de estimativa de 201 g m^{-2} , o que dá segurança quanto à precisão do modelo. Isto é válido principalmente quando consideradas as estimativas no final do ciclo, pois, quando o total de matéria seca acumulada pelo milho atingiu mais de 20100 kg , o percentual do erro foi menor do que 1%.

O baixo erro padrão de estimativa que o modelo possui, quando utilizado em períodos longos, não foi observado quando foram utilizados dados de períodos curtos. Essa observação já havia sido feita por RUSSEL et al. (1989) e segundo eles, os modelos energéticos são pouco confiáveis em períodos curtos.

O modelo energético, para estimativa do potencial de acúmulo de matéria seca da parte aérea do milho, aferido a partir dos dados obtidos no verão de 1998/99, apresentou precisão nas estimativas de matéria seca acumulada durante o ciclo da cultura do

milho. A decomposição dos resíduos não detectou imprecisões nos testes do erro devido à predição e devido à regressão, para os cinco anos em que o modelo foi aplicado e dois híbridos utilizados, conforme apresentado na Tabela 1. Portanto, o modelo é válido para a estimativa da matéria seca acumulada em condições ambientais sem limitações ao crescimento e desenvolvimento desses híbridos de milho e possivelmente para híbridos com características semelhantes.

A eficiência de uso da radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada pelo milho não irrigado foi de $2,44 \text{ g MJ}^{-1}$. Esse coeficiente não pode ser aferido pois é representativo para o nível de deficiência hídrica ocorrido, sendo, portanto, variável entre os anos. Contudo é uma informação importante na busca de modelos de estimativa do efeito da deficiência hídrica sobre a cultura do milho, com os resultados de outros anos como o valor de $1,44 \text{ g MJ}^{-1}$, obtido por FRANÇA et al. (1999).

Conclusões

Modelos energéticos de estimativa da produção de biomassa aérea em milho podem utilizar tanto a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada como absorvida, pois essas mantem uma razão linear entre si, mesmo em diferentes níveis de deficiência hídrica.

A restrição hídrica no período de crescimento da cultura diminui a eficiência de interceptação (ϵ_{int}) e de absorção (ϵ_{abs}) da RFA, devido à redução do IAF e ao enrolamento das folhas.

Para as condições do Rio Grande do Sul, a eficiência de uso da RFA em milho, sem

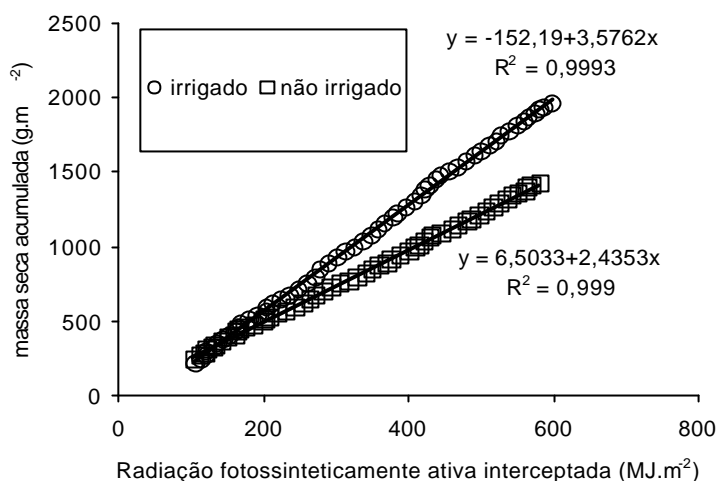


Figura 4 Relação entre a matéria seca acumulada e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada em milho (Pioneer 3063), irrigado e não irrigado. EEA/Eldorado do Sul, RS, 1998/99.

limitação hídrica, está dentro da ordem de grandeza prevista para espécies de metabolismo C_4 .

O modelo energético de estimativa do acúmulo de biomassa aérea é adequado e consistente para modelos potenciais em períodos longos, como o ciclo da cultura do milho.

Referências Bibliográficas

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R. **Agroclima da Estação Experimental Agrônômica** Porto Alegre: Faculdade de Agronomia da UFRGS, 1990. 91 p. (não publicado).

BONHOMME, R. et al. Relations entre production de matière sèche aérienne et énergie interceptée chez différents genotypes de maïs. **C. R. Académie Sciences**, Série III, Paris, n. 294, p. 393-397, 1982.

Tabela 1. Indicadores da precisão nas estimativas da matéria seca aérea do milho irrigado pelo modelo energético. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

Indicadores	Pionner 3230 1993/94	Pionner 3230 1994/95	Pionner 3230 1995/96	Pionner 3230 1996/97	Pionner 3063 1998/99
Erro de precisão	8470,36	2926,47	11563,60	2702,57	3784,13
Erro da regressão	3914,42	815,19	8848,19	732,44	6980,70
Erro aleatório	14565,55	5531,40	12779,20	9018,62	4669,94
Erro total	26950,32	9273,06	33191,00	12453,60	15434,80

- FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H. ROSA, L. M. G. Modelagem do crescimento do milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999.
- GALLO, K. P.; DAUGHTRY, C. S. T. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 50, p. 752-756, 1986.
- GOSSE, G. et al. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v. 6, p. 47-56, 1986.
- HAMMER, G.L.; VANDERLIP, R.L. Genotype-by-environment interaction in grain sorghum: I. Effects of temperature on radiation use efficiency. **Crop Science**, Madison, v. 29, p. 370-376, 1989.
- LEGUIZAMÓN ROJAS, C.A. **Alterações físico-hídricas de um podzólico em função do manejo de solo**. Porto Alegre: UFRGS, 1998, 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Programa de pós-graduação em Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (UFRGS).
- MONSI, M.; SAEKI, T. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany**, Tokyo, v. 14, p. 22-52, 1953.
- MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 695-697, 1996.
- RUSSEL, G.; JARVIS, P. G.; MONTEITH, J. L. Absorption and radiation by canopies and stand growth. In: . RUSSEL, G.; MARSHALL, B. & JARVIS, P. G. (eds.). **Their growth, form and function**. Cambridge: Society for experimental biology/ University Press, 1989. p. 31-40 (Seminar Series 31).
- VARLET-GRANCHER, C. et al. Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v. 9, p. 419-439, 1989.
- VARLET-GRANCHER, C. et al. Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert vegetal. **Oecologia Plantarum**, Paris, v. 3, n. 17, p. 3-26, 1982.