

Sys 318233

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

**MODELAGEM DA MATÉRIA SECA E DO RENDIMENTO DE GRÃOS DE
MILHO EM RELAÇÃO À DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

Artur Gustavo Müller
Engenheiro Agrônomo, Mestre (USP)

Tese apresentada como um dos requisitos para obtenção do
Grau de Doutor em Fitotecnia, área de concentração em Agrometeorologia

**AGR
T
633.1558
M958m**

Porto Alegre (RS), Brasil
Agosto de 2001



ARTUR GUSTAVO MÜLLER
Engenheiro Agrônomo - UFRGS
Mestre em Agrometeorologia - ESALQ - USP

TESE

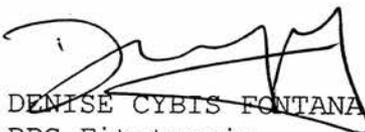
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM FITOTECNIA

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

Aprovado em: 23.08.2001
Pela Banca Examinadora


HOMERO BERGAMASCHI
Orientador-PPG Fitotecnia

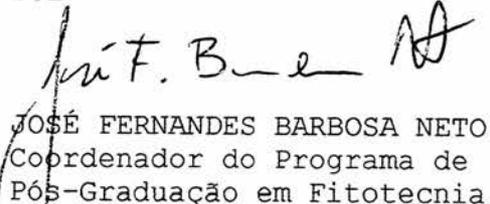

DENISE CYBIS FONTANA
PPG Fitotecnia


JOÃO ITO BERGONCI
PPG Fitotecnia


RONALDO MATZENAUER
FEPAGRO/SCT-RS


SANDRO LUIS PETTER DE MEDEIROS
CCR/UFSM

Homologado em: 08.10.2001
Por


JOSÉ FERNANDES BARBOSA NETO
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia


GILMAR ARDUINO BETTIO MARODIN
Diretor da Faculdade
de Agronomia

AGRADECIMENTOS

Aos professores do Setor de Agrometeorologia, do Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da UFRGS, pelos ensinamentos e amizade, em especial ao professor Homero Bergamaschi pela orientação, estímulo e amizade que teve durante o curso.

Ao Professor João Ito Bergonci e às colegas Bernadete Radin e Solange França pela disponibilização dos dados dos experimentos por eles conduzidos.

À minha esposa Lenice Medeiros pelo estímulo e auxílio em todos os momentos em que precisei.

Aos meus pais e familiares pela formação inicial que tive o privilégio de receber.

A todos os colegas, que de alguma forma, marcaram e me auxiliaram nesta trajetória.

A UNIJUÍ, UFRGS e CAPES pela viabilização financeira e estrutural do trabalho realizado.

MODELAGEM DA MATÉRIA SECA E DO RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO EM RELAÇÃO À DISPONIBILIDADE HÍDRICA¹

Autor: Artur Gustavo Müller

Orientador: Prof. Homero Bergamaschi

SINOPSE

A modelagem auxilia o entendimento de sistemas complexos, como os cultivos agrícolas, permitindo avanços no diagnóstico e no aconselhamento técnico, à medida em que melhora a estimativa dos efeitos do ambiente sobre o crescimento das plantas e o rendimento das espécies. Múltiplos fatores interagem nos processos, exigindo que os modelos sejam ajustados e aferidos, antes de generalizá-los ou usá-los em dada região. Este trabalho objetivou ajustar os modelos energético e de elaboração do rendimento do milho, avaliando relações entre os seus coeficientes e índices de consumo de água da cultura. Foram feitas medições semanais de matéria seca aérea (MS) e índice de área foliar (IAF), determinação dos componentes do rendimento de grãos e observações meteorológicas diárias. A cultura foi submetida a diferentes doses de rega em Eldorado do Sul, de 1993/94 a 1998/99, e a diferentes densidades de planta e níveis de nitrogênio em Ijuí, em 2000/01, ambos no Rio Grande do Sul. O modelo linear segmentado foi ajustado à variação do IAF, permitindo estimar valores diários. O coeficiente de extinção para radiação fotossinteticamente ativa - RFA (0,68), a fração absorvida de RFA interceptada (0,925) e a máxima eficiência de uso da RFA interceptada na produção de MS ($3,58\text{g.MJ}^{-1}$) estão de acordo com valores da literatura, para milho. A relação entre os componentes do rendimento e seus níveis máximos (530 grãos por espiga e 0,385 g por grão) permitiram estimar um rendimento de 13.610 Kg.ha^{-1} , na região, em alto nível tecnológico. O modelo energético é adequado para estimar a produção de MS do milho. Ele pode ser incorporado ao modelo de elaboração do rendimento para avaliar o desempenho da cultura, em ambiente não limitante. Os coeficientes dos modelos estão relacionados à evapotranspiração relativa (ETr/ETm) e ao deficit hídrico relativo ($1-\text{ETr/ETm}$).

¹ Tese de doutorado em Fitotecnia, área de concentração Agrometeorologia. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil (120p.), agosto de 2001

MODELING THE PLANT GROWTH AND THE GRAIN YIELD OF MAIZE CROPS RELATED TO THE WATER AVAILABILITY²

Author: Artur Gustavo Müller
Advisor: Prof. Homero Bergamaschi

ABSTRACT

The use of models had aimed the understanding of complex systems such as field crops, allowing advances in diagnosis and technical advisory, as the environmental effects on the plant growth and grain yield become better estimated. Since an interaction of several factors is involved in the processes, the models must be adjusted and verified, prior to be generalized or used in a specific region. This work had the objective to adjust the energetic and the grain yield elaboration models in maize crops, also verifying relations among its coefficients and some indexes of crop water use. Weekly measurements of aerial dry matter (DM) and leaf area index (LAI), determinations of the grain yield components, and daily weather observations were made. Maize crops were submitted to different irrigation levels in Eldorado do Sul, from 1993/94 to 1998/99, and to different plant densities and levels of nitrogen in Ijuí, in 2000/01, both in Southern Brazil. The segmented linear model could be adjusted to variations of LAI, which may allow daily estimations. The extinction coefficient for photosynthetically active radiation - PAR (0.68), the absorbed fraction in the intercepted PAR (0.925), and the maximum intercepted PAR use efficiency for DM production (3.58 g.MJ^{-1}) are in accordance to values founded in the literature, for maize crops. Relations between the grain components, as well as its maximum levels (530 kernels per ear and 0.385 g per kernel) allowed to estimate a grain yield of $13,610 \text{ Kg.ha}^{-1}$ for the region, under high technology. The energetic model is adequate to estimate the DM production of maize. It can be incorporated to the grain elaboration model in order to evaluate the performance of the crop in non-limiting conditions. The coefficients of the models are related to the relative evapotranspiration (ETr/ETm) and to the relative water deficit ($1-\text{ETr/ETm}$).

² Doctoral thesis in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (120p) August, 2001.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Efeito da temperatura sobre o desenvolvimento do milho.....	5
2.2. Modelos de estimativa do índice de área foliar (IAF) ..	7
2.3. Modelos energéticos	9
2.3.1. Fração fotossinteticamente ativa (RFA) da radiação solar global (Rg)	9
2.3.2. Estrutura dos modelos energéticos	12
2.3.2.1. Coeficiente de extinção	13
2.3.2.2. Eficiência de uso da RFA interceptada e absorvida	14
2.4. Curvas potenciais	23
2.5. Efeito da deficiência hídrica	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1. Caracterização dos experimentos conduzidos em Eldorado do Sul	32
3.1.1. Solo e clima	32

	Página
3.1.2. Delineamento Experimental	33
3.1.3. Manejo da cultura	36
3.1.4. Dados metereológicos	37
3.2. Caracterização do experimento conduzido em Ijuí	38
3.3. Determinações nos experimentos de Eldorado do Sul	40
3.3.1. Potencial da água no solo	40
3.3.2. Transpiração das plantas	40
3.3.3. Desenvolvimento e crescimento da cultura	41
3.3.4. Graus-dia acumulados	41
3.3.5. Índice de área foliar	42
3.3.6. Componentes do balanço de radiação fotossinteticamente ativa (RFA)	42
3.3.7. Rendimento de grãos e seus componentes.....	43
3.3.8. Estimativas das deficiências hídricas	44
3.4. Ajuste dos modelos	48
3.4.7. Modelo do índice de área foliar (IAF)	48
3.4.8. Modelo energético	49
3.4.9. Modelo da elaboração do rendimento do milho .	51
3.5. Verificação dos modelos	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1. Avaliação das condições hídricas da cultura	53

	Página
4.2. Considerações sobre estimativas dos componentes do balanço hídrico	55
4.2.1. Profundidade do sistema radicular	55
4.2.2. Estimativa da disponibilidade de água no solo	56
4.2.3. Estimativa da evapotranspiração real	57
4.3. Ajuste do modelo de estimativa do índice de área foliar	60
4.4. Ajuste do modelo energético	67
4.5. Ajuste do modelo de elaboração do rendimento	83
5. CONCLUSÕES	95
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
7. APÊNDICES	107

1. INTRODUÇÃO

Para atender a um dos objetivos primordiais do agrônomo, que é de auxiliar os agricultores na tomada de suas decisões, são necessárias metodologias adequadas para diagnosticar os fatores limitantes do desempenho de suas atividades, bem como avaliar as alterações nos riscos de perdas devido às modificações a serem realizadas. Em ambos os casos, é necessário entender e simular os resultados da relação de uma população de plantas com o meio.

Esta relação é extremamente complexa, visto que são inúmeros os fatores condicionantes e suas interações que determinam o crescimento e desenvolvimento dos vegetais. Esta relação também é dinâmica no tempo, sendo que a relação oferta-demanda existente entre a população de plantas e o meio modifica-se constantemente pela alteração da demanda, com o crescimento e o desenvolvimento da cultura, e da oferta devido às alterações das condições meteorológicas e das técnicas aplicadas ao meio.

A cultura do milho apresenta em seus sistemas de cultivo uma grande variação de técnicas associadas, fazendo com que esta complexidade tenha uma diversidade ainda maior. Os modelos possibilitam o estudo e o entendimento desses sistemas complexos. Como sugerem Hanks e Ritchie (1978), sendo os modelos uma imitação da realidade, eles podem ser

utilizados como uma técnica para organização dos conhecimentos sobre um objeto em um sistema, mostrando o efeito da interação de vários fatores.

Sendo o milho uma cultura C₄, possui um alto ponto de saturação luminosa e, portanto, um elevado potencial produtivo quando ocorre alta disponibilidade de radiação solar. Contudo, simultaneamente à maior disponibilidade energética também ocorre aumento da demanda evaporativa que, no caso do Rio Grande do Sul, pode implicar em um aumento no risco de deficiência hídrica e, então, em queda de rendimento.

Desta forma, dentre os inúmeros fatores que afetam o desempenho da cultura do milho em nível de campo, a deficiência hídrica tem-se constituído numa das principais limitações. Estudos abrangendo quatro regiões distintas do Rio Grande do Sul demonstraram que 90% da variação do rendimento de grãos podem ser estimados pela relação estabelecida com o consumo relativo de água (Matzenauer et al., 1995).

Considerando-se que: a) para fins de diagnóstico das causas de variação de rendimento do milho é necessário estabelecer modelos para entender a complexidade de fatores e condicionantes que interagem em um meio cultivado; b) o conhecimento do desempenho de uma cultura em condições de adequado fornecimento de água e nutrientes é fundamental para a construção de modelos culturais, c) um dos principais fatores limitantes do rendimento de milho é a deficiência hídrica. Este trabalho tem por objetivos:

- ajustar um modelo energético de estimativa do acúmulo de matéria seca da cultura do milho na parte aérea;
- ajustar um modelo de elaboração do rendimento de milho, nas condições da Depressão Central do Rio Grande do Sul;

- verificar a existência de relações entre os indicadores potenciais da elaboração dos componentes do rendimento do milho e o consumo relativo de água nos respectivos períodos de formação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Baseado nas informações contidas em Jones et al. (1987) e Sinclair e Seligman (1996), pode-se afirmar que os modelos apresentaram uma grande evolução nas últimas três décadas, que foi impulsionada pela perspectiva de integrar os efeitos de fatores e suas interações, possibilitando simulações de sistemas complexos. Desta forma, qualificaram-se as informações disponíveis para interferir nos sistemas, melhorando o seu desempenho produtivo e/ou mantendo a sua sustentabilidade. Esta perspectiva, aliada ao desenvolvimento da informática, ocorrido no período, impulsionou a elaboração de uma vasta diversidade de modelos com diferentes objetos de estudo, níveis de observação, precisão e condições de contorno.

Para Sinclair e Seligman (1996), os modelos de culturas estão em evolução e tendem a aumentar o detalhamento descritivo do funcionamento das relações bióticas e abióticas do campo cultivado, aumentando o número de parâmetros e descendo a níveis de organização mais básicos. Estes tendem a ser mais genéricos do que os modelos originais, que se caracterizavam por serem mais simples e empíricos.

A idéia de que os modelos evoluirão, integrando cada vez mais processos envolvidos nos sistemas e tornando-se, desta forma, mais genéricos, é compartilhada por Jame e Cutforth (1996). Estes autores acrescentaram que as melhorias nas técnicas e na acurácia dos modelos

culturais têm convencido vários cientistas da necessidade de seu uso rotineiro para tomada de decisões em nível agrícola. Com esta evolução os modelos culturais se tornarão um importante mecanismo de síntese dos conhecimentos sobre a planta e suas relações com o meio.

Contudo, a euforia não é generalizada e vários autores apresentam alguns contrapontos aos modelos que integram vários processos nas suas simulações. Passioura (1996) argumentou que os modelos de simulação de culturas estão longe das necessidades. Os mesmos deveriam ser o mais simples possível, com um apetite moderado por dados, e deveriam ser baseados em relações empíricas robustas entre algumas variáveis, já que não existe total confiança na sua estrutura mecanística.

A necessidade de modelos simples também é compartilhada por Monteith (1996), que sugere aos profissionais da área condensarem os seus modelos, removendo componentes que mais prejudicam o seu uso do que contribuem no aumento da precisão dos resultados.

2.1. Efeito da temperatura sobre o desenvolvimento do milho

De acordo com as revisões efetuadas por Wang (1960) e Camargo (1984), muitas pesquisas se sucederam desde os primeiros trabalhos de Reamur, datados de 1735, fazendo inúmeras críticas e adaptações ao sistema de unidades térmicas e graus-dia. Porém, o princípio que originou estes estudos permaneceu inalterado, baseando-se no fato de que a planta necessita uma certa quantidade de energia para completar uma determinada etapa fenológica ou o seu ciclo. O conceito de graus-dia pressupõe a existência de uma temperatura base, abaixo da qual a planta não se desenvolve, que existe uma relação linear entre o acréscimo da temperatura e

o desenvolvimento da planta, que o efeito das temperaturas diurnas e noturnas é idêntico e que o efeito de outros fatores é desprezível.

Gilmore e Rogers (1984) consideraram que os graus-dia, calculados a partir da temperatura média do ar e da mínima basal da cultura, não representam as unidades de calor efetivas para as plantas, pois não são levadas em consideração as temperaturas extremas. Eles sugeriram adicionar correções pelas temperaturas mínima basal e ótima, que para o milho seriam de 10°C e 30°C, respectivamente, considerando que temperaturas acima da ótima retardam o crescimento. Berlato et al. (1974) acrescentaram estes conceitos na metodologia de cálculo dos graus-dia para o milho, obtendo um aumento na precisão de estimativa da soma térmica para o período da semeadura ao espigamento.

Quanto aos valores das temperaturas cardeais para milho, vários autores, entre eles Gilmore e Rogers (1984), Berlato e Sutili (1976) e Tollenaar e Hunter (1983), fizeram estimativas para diferentes híbridos e regiões do planeta, encontrando valores que variam de 4°C a 10°C para a temperatura base inferior e 30°C a 44°C para a temperatura base superior. Kiniry (1991) propôs a temperatura base inferior de 8°C e o limite máximo de temperatura de 34°C, sendo os seus efeitos atribuídos linearmente desde um máximo, entre 26°C a 34°C, até zero para 44°C.

Apesar da temperatura do ar ser o principal fator determinante da velocidade de desenvolvimento do milho, outros fatores como o estresse hídrico e o fotoperíodo também influenciam. Kiniry (1991) afirmou que alguns modelos, como o CORNF e o CERES-Maize, usam o período de exposição à luz e a temperatura para prever o desenvolvimento, sendo que a exposição a fotoperíodos superiores a 12,5 h atrasa a iniciação do pendoamento em genótipos sensíveis, aumentando o número total de folhas.

2.2. Modelos de estimativa do índice de área foliar (IAF)

Flesch e Dale (1987) elaboraram um modelo de estimativa do IAF baseado em um calendário de exigências térmicas normalizado da cultura do milho (CETCM), no qual o ciclo é dividido em três períodos: I) período anterior ao florescimento da cultura; II) do florescimento ao início da rápida senescência foliar; III) período de rápida senescência foliar. A estimativa do IAF durante o primeiro período é realizada por uma função do CETCM e da área foliar máxima por planta sem deficiências, sendo esta predita a partir da densidade populacional e de um coeficiente do híbrido. O declínio do IAF, no segundo período, é estimado com o CETCM, o IAF máximo e um segundo coeficiente do híbrido. Durante o terceiro período a estimativa do IAF é baseada no número de dias após o início da rápida senescência de folhas.

Em condições de estresse hídrico uma estimativa da deficiência relativa é necessária. O modelo proposto por Flesch e Dale (1987), tem uma performance satisfatória durante os períodos de pré-florescimento e de enchimento de grãos, apresentando um erro de predição de 11% para diferentes datas de semeadura, densidades populacionais, disponibilidade hídrica e diferentes necessidades térmicas dos híbridos.

As sugestões de Monteith (1996) para que os profissionais condensem os modelos, removendo componentes que mais prejudicam seu uso do que contribuem para o aumento da precisão dos resultados, parece ser atendida por Brisson et al. (1990), quando estes propõem uma simplificação do modelo acima exposto. Neste a estimativa do IAF potencial do milho é uma função dos graus-dia acumulados, sendo o ciclo da cultura dividido nos mesmos três períodos acima citados. Para cada período é estimada uma relação linear da variação do IAF com os graus-dia acumulados, assim constituindo um modelo linear multi-segmentado.

Este modelo não necessita coeficientes que variam conforme o híbrido, sendo ajustado a partir de uma série de dados oriundos de vários anos e locais, o que lhe confere a possibilidade de ser utilizado em uma região relativamente grande para um modelo empírico. Contudo, os autores ressaltam que o modelo não avalia densidades populacionais extremas e, devido a isto, não deve ser utilizado para populações acima de 115.000 plantas por hectare.

Sinclair et al. (1996) previram que os modelos evoluíram para serem cada vez mais mecanísticos, incorporando cada vez mais fatores e inserindo em si os processos de funcionamento dos níveis de organização dos sistemas inferiores, para conseguir simular os níveis superiores com maior generalidade. Suas idéias se baseavam em proposições como as de Timothy et al. (1995a, 1995b e 1995c). Trata-se de incorporar conhecimentos existentes acerca da divisão e expansão celular nos modelos de estimativa do IAF de monocotiledôneas. Os dados de entrada nesse modelo incluem o potencial da água do meio intercelular e a temperatura celular. O modelo simula bem a expansão foliar global e apresenta sensibilidade à deficiência hídrica relativa, mas não simula a interação entre o estresse hídrico e a expansão foliar, bem como a duração da expansão foliar em períodos de limitação hídrica.

Um modelo simplificado de estimativa do IAF do milho, proposto por Birch et al. (1998), é um exemplo de aceitação das sugestões de Passioura (1996), que os modelos sejam simplificados com um mínimo de dados de entrada. Neste modelo as áreas de uma folha e de toda a planta são estimadas pelo número de folhas, enquanto a área foliar senescente é estimada por uma função da área foliar máxima por planta e da soma térmica. Tendo este modelo boa capacidade de predição, é excluída a necessidade de uso de coeficientes genéticos de ajuste, necessários em vários modelos,

sendo que os parâmetros de entrada são obtidos quer por medições quer por estimativas, mais facilmente do que nos modelos mais sofisticados.

2.3. Modelos Energéticos

Os organismos vivos são sistemas termodinamicamente abertos e necessitam energia para o seu funcionamento. Para os vegetais autotróficos a fonte de energia é o sol e a fotossíntese é o processo pelo qual esta é transformada em compostos estáveis, estocáveis e disponíveis aos organismos. Por isto, segundo Charles-Edwards (1982), é apropriado que as análises de crescimento de plantas sejam baseadas na avaliação da eficiência pela qual a radiação solar incidente é utilizada no acúmulo de matéria seca.

Os modelos que utilizam o conceito de rendimento energético evoluíram a partir do trabalho pioneiro de Monsi e Saeki (1953), que relacionaram a radiação solar incidente com o acúmulo de matéria seca da parte aérea para estimar a eficiência de acúmulo de fotoassimilados.

2.3.1. Fração fotossinteticamente ativa da radiação solar global (R_g)

Segundo McCree (1972), o fluxo de fótons na faixa de comprimento de onda entre 400 e 700 nm é que estima, de forma mais precisa, a radiação útil à realização de fotossíntese. Porém, não existem sensores que simulem o espectro de absorção dos pigmentos captadores de energia para o processo fotossintético. Por esta razão, os modelos energéticos para estimativa dos potenciais produtivos passaram a ser ajustados a partir da quantificação da parcela visível da radiação solar incidente, aumentando a precisão das estimativas pelos modelos de potenciais produtivos.

Esta relação, apesar de ser robusta em várias regiões do mundo, pode ser modificada pelas condições atmosféricas, como foi demonstrado por Allados e Alados-Arboledas (1996), que consideram a cobertura de nuvens como o principal alterador desta relação.

Em um trabalho onde foram utilizados dados horários oriundos de duas estações radiométricas, durante dois anos, Alados e Alados-Arboledas (1999) testaram uma série de modelos empíricos para estimar a fração de radiação fotossinteticamente ativa existente nos componentes de radiação solar direta e difusa, em função de parâmetros atmosféricos. Para obter um modelo aceitável de estimativa desta fração dois parâmetros devem ser incluídos: a "sky clearness", que é dependente da quantidade de nuvens e de aerossóis, e o "skylight brightness", que é dependente da quantidade de aerossóis e da espessura das nuvens, sendo que as variáveis ângulo zenital e temperatura do ponto de orvalho tiveram um efeito secundário. O uso destes modelos reduziu os erros de estimativa a valores próximos dos erros de medição da RFA.

Contudo, modelos empíricos de estimativa da radiação fotossinteticamente ativa incidente, a partir da radiação global, carregam em seus coeficientes as condições do meio em que foram concebidos. Desta forma, se um modelo foi obtido a partir de dados de um período suficientemente representativo das variações ambientais, apresentará baixo erro de estimativa. Sendo este modelo validado com dados independentes, mesmo sendo empírico, tem sua utilização assegurada para as condições do local em que foi elaborado. Desta forma, poderá ser utilizado em detrimento de aperfeiçoamentos que sejam incorporados para torná-lo mais genérico e preciso, que normalmente causarão desvantagens de uso por um maior

número de parâmetros de entrada de dados e de maior dificuldade de obtenção.

O fotoperíodo também exerce influência na fração de radiação global que é fotossinteticamente ativa, devido à modificação do ângulo de inclinação da radiação solar. Resultados de Breiton e Dodd (1976) demonstraram que a fração de RFA em R_g variou de 0,44 para 0,46 entre fotoperíodos longo e curto. Pode-se, então, inferir que a porção de RFA em R_g será menor quanto maior for o ângulo de elevação da radiação solar, em relação à superfície do solo.

Este mesmo efeito ocorre durante o dia, quando a fração de radiação fotossinteticamente ativa na radiação do sol tem sua maior variação devido ao seu ângulo de incidência, que altera a espessura da camada de atmosfera atravessada pela radiação solar. A porção de RFA em R_g incidente aumenta com a diminuição do ângulo dos raios solares em relação ao horizonte, pois a radiação incidente na superfície, nestes casos, é composta por comprimentos de onda mais energéticos e que sofrem maior difusão.

Desconsiderando as frações de radiação ultravioleta, que em sua maioria são absorvidas pela atmosfera e não atingem a superfície do solo, os comprimentos de onda do espectro visível são os mais energéticos da radiação solar. Estes comprimentos de onda estão em maior proporção no componente de radiação difusa, em relação à radiação global. A radiação difusa compõe a maior parcela da radiação solar sobre uma superfície horizontal quando a elevação solar (em relação ao horizonte) for pequena. Desta forma, as porções de RFA em R_g tendem a ser maiores nas primeiras e últimas horas do período diurno.

Para evitar o efeito do horário de leitura sobre a porção de RFA incidente em R_g , Varlet-Grancher et al. (1989) estimaram totais diários de R_g e

RFA, obtendo valores de $0,48 \pm 0,02$ megajoule de RFA, para cada megajoule de R_g que incide sobre uma superfície horizontal exposta à radiação solar direta.

Mesmo para totais diários, algumas variações na porção de RFA em R_g ocorrem devido às variações da inclinação média do sol, que depende da latitude e da declinação solar no período, além do grau de nebulosidade da atmosfera. Desta forma, variações nesta porção são esperadas entre locais e épocas do ano, nas regiões de maiores latitudes ou que apresentam variação na umidade e quantidade de núcleos de condensação durante o ano. Breiton e Dodd (1976) encontraram porções de 0,50 a 0,58 de RFA em R_g , em dias com baixa quantidade de radiação solar, e de 0,45 a 0,47 de RFA em R_g , em dias com alta irradiância solar, comprovando o efeito da nebulosidade sobre a porção de RFA em R_g . Para as condições da Depressão Central do Rio Grande do Sul, Pandolfo (1995) calculou, a partir dos valores diários de RFA e R_g , uma porção de 0,43, que é próximo a 0,42 encontrado por França et al. (1999), para o mesmo local.

2.3.2. Estrutura do modelo energético

Um dos modelos energéticos mais utilizados foi descrito por Gosse et al. (1986) e utilizado por vários autores. O mesmo propôs uma relação entre a radiação solar interceptada por uma cobertura vegetal com a biomassa acumulada, para estimar a produção potencial de uma cultura. Esta relação apresenta dois parâmetros biológicos, que são a eficiência de absorção da radiação fotossinteticamente ativa incidente e a eficiência de uso desta na produção de matéria seca. Por sua vez, a eficiência de absorção incorpora a eficiência de interceptação, considerando que a parcela de RFA interceptada,

que é absorvida pelo dossel de plantas, se mantém constante durante todo o ciclo.

✖ A eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (ϵ_{int}) é o parâmetro que estima a capacidade da população de plantas em interceptar a radiação fotossinteticamente ativa incidente, sendo dependente da superfície de captação de radiação na população vegetal (área foliar) e da forma e ângulo com que esta superfície é distribuída no dossel de folhas. As estimativas de eficiência de interceptação são obtidas a partir de equações exponenciais que utilizam dois fatores determinantes: o índice de área foliar e o coeficiente de extinção da radiação pelo dossel.

✎ A eficiência de absorção (ϵ_{abs}) é a fração da RFA incidente que é absorvida, sendo sempre uma parcela da eficiência de interceptação, podendo ser estimada pela própria eficiência de interceptação multiplicada pela fração de RFA interceptada que é absorvida pelas plantas. Em milho esta fração é relativamente constante e menor do que 10 %, segundo Varlet-Grancher et al. (1989), sendo estimada em 3,5 % por Gallo e Daughtry (1986) e tendo uma variação entre 2 e 5 %, segundo trabalho de Hammer e Vanderlip (1989).

2.3.2.1. Coeficiente de extinção

O coeficiente de extinção da radiação solar é a expressão numérica da relação entre área de sombra projetada em uma superfície horizontal e a área de folha que a produz (Monteith, 1975). Para dados médios diários ele é relativamente estável em espécies que apresentam homogeneidade de tamanho, distribuição e ângulo de inclinação das folhas, conforme pode ser verificado para o milho, na Tabela 1. Durante o dia, o coeficiente de extinção varia em função do ângulo de incidência da radiação solar, sendo que próximo ao meio-dia ocorrem os menores valores.

No milho o coeficiente de extinção tem apresentado pequenas variações nas estimativas realizadas, que são atribuídas a alterações no tamanho, distribuição e ângulo de inclinação das folhas, bem como pela densidade populacional.

Tabela 1. Coeficientes de extinção (K) estimados para o milho a partir da radiação interceptada ou absorvida.

	K para interceptação	K para absorção
Varlet-Grancher et al. (1982)		0,68 a 0,73
Gallo e Daughtry (1986)		0,66
Montheith (1969)		0,65
Gosse et al. (1986)	0,7	

2.3.2.2. Eficiência de uso da RFA interceptada e absorvida

A eficiência de uso da RFA interceptada ou absorvida (ϵ_{uso} da RFA) estima a capacidade que uma planta ou população de plantas possui de transformar a RFA interceptada ou absorvida em matéria seca aérea acumulada. Este parâmetro incorpora, além da eficiência de uso da RFA no processo fotossintético, a eficiência de transporte dos fotoassimilados para as regiões de crescimento e armazenamento, bem como a eficiência de transformação destes fotoassimilados em substâncias estruturais, de regulação e de armazenamento das plantas.

A eficiência de uso da RFA (interceptada ou absorvida) é o coeficiente que apresenta as maiores variações entre estimativas para a mesma cultura, devido à multiplicidade de processos que são estimados por

um único coeficiente, tendo cada um deles um conjunto de variáveis intervenientes, dentro do modelo energético.

A ϵ_{uso} da RFA interceptada ou absorvida da cultura do milho tem grande variação entre os valores encontrados na literatura, sendo que as menores estimativas não chegam a 50 % das maiores estimativas, conforme dados constantes na Tabela 2. As causas desta variação não são suficientemente conhecidas para a elaboração de um modelo de estimativa preciso deste coeficiente, para diferentes ambientes. Devido a isto é que são realizadas estimativas regionais, cujos trabalhos buscam a identificação dos fatores que produzem esta variação e a quantificação do seu efeito sobre o coeficiente.

*Para Russel et al. (1989), a ϵ_{uso} da RFA possui, além dos erros aleatórios, três grandes fontes de erro de estimativa que são: a) a não consideração da matéria seca subterrânea, que pode variar em função das condições de textura, estrutura e umidade do solo, mesmo em condições supostamente não limitantes; b) grande parcela da radiação solar incidente sobre o dossel que pode ser interceptada por superfícies não fotossintetizantes, como, por exemplo, inflorescências apicais; c) variações na duração do período de medições, associadas à matéria seca produzida, com uma pequena defasagem, podendo causar erros quando são comparados dados de diferentes períodos ou experimentos.

Tabela 2. Valores estimados de eficiência de uso da RFA interceptada (ϵ_{uso}) pela cultura do milho, para diversos genótipos, locais e anos.

Autores	Condições de contorno	ϵ_{uso}^1 (g.m ⁻²)
Williams et al. (1965)		3,2
Ustenko e Yanova (1967)		3,4 a 4,8
Warren-Wilson (1967)		3,2
Williams (1968)		3,56
Griffin (1980)		4,4
Yao (1980)		3,2
Jones (1981)	população de 6 pl.m ⁻²	4,5
	população de 4 pl.m ⁻²	3,6
Bonhomme et al. (1982)	período vegetativo	3,45
	período reprodutivo	2,23
Sivakumar e Virmani (1984)		3,8
Cabelguenne (1987)		4,1
Kiniry (1987)	população de 3,9 pl.m ⁻²	2,1
	população de 6,4 pl.m ⁻²	3,9
	população de 10,4 pl.m ⁻²	3,4
Tollenaar e Bruulsema (1988)		3,15
Sinclair e Horie (1989)		3,78
França (1997)		2,59

¹ As referências que continham a ϵ_{uso} da RFA absorvida foram convertidas em ϵ_{uso} da RFA interceptada por multiplicação pelo coeficiente 0,92. As que continham os valores em g/MJ de radiação global interceptada foram divididas por 0,45 e as que continham a ϵ_{uso} em percentagem da RFA interceptada foram divididas por 2. Segundo Russel et al. (1989) e Bonhomme (1982) em uma composição típica da matéria seca do milho há um conteúdo de energia de 20 KJ.g⁻¹, o que corresponde a uma conversão da eficiência energética pela divisão por 2, ou seja uma ϵ_{uso} da RFA de 3% terá uma ϵ_{uso} da RFA interceptada de 1,5 g.MJ⁻¹.

Segundo os mesmos autores, outro fator determinante da variabilidade da ϵ_{USO} da RFA interceptada é a diferença na quantidade de fotoassimilados necessários para o acúmulo de uma unidade de matéria seca, sob diferentes formas orgânicas que, são formadas durante o ciclo da cultura. Assim, no período em que ocorre o acúmulo de amido a eficiência será menor do que em períodos em que a planta está armazenando açúcares. Outro fator que pode provocar a variação na ϵ_{USO} da RFA é a respiração, que é variável em função da matéria seca acumulada em tecidos não fotossintetizantes, dos gastos em simbiontes e das condições ambientais, aumentando principalmente com a elevação da temperatura.

A eficiência de utilização da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pode sofrer diminuições durante o ciclo de desenvolvimento dos vegetais em regiões temperadas, devido ao aumento da temperatura do ar e ao aumento da biomassa da cultura, que elevam o nível de gastos com a respiração. Estas suposições de MacCree e Silsbury (1978) levaram Kiniry et al. (1989) a tentar relacionar as variações de eficiência de utilização da radiação fotossinteticamente ativa interceptadas pela cultura do milho, obtidas até então, com as condições ambientais em que estas foram determinadas, mais especificamente a temperatura média do período e a radiação solar incidente.

Os mesmos autores procuraram verificar se o vegetal poderia estar em condições de excesso de respiração, devido a altas temperaturas e/ou disponibilidade de radiação acima do nível de saturação. No entanto, os resultados disponíveis não foram suficientes para estabelecer uma relação

consistente, devido às múltiplas variáveis que interferem nos diferentes ambientes e não apenas a temperatura.

Maginn e King (1990) efetuaram um estudo micrometeorológico sobre alfafa e milho, medindo os fluxos de calor, vapor d' água e CO₂ entre os dosséis de plantas e a atmosfera, utilizando o método de balanço de energia, pela razão de Bowen. As medições dos perfis de CO₂ foram realizadas utilizando um analisador infravermelho de gás. Os resultados dos fluxos de CO₂ permitiram a estimativa da taxa fotossintética líquida. A comparação da taxa fotossintética líquida entre as duas culturas, durante seus ciclos, permitiu observar que baixas temperaturas reduziram a eficiência fotossintética do milho mesmo com um incremento da disponibilidade de radiação solar, o que não foi observado na alfafa. Após uma passagem de massa de ar frio, a temperatura aumentou e o milho voltou a apresentar taxa de eficiência fotossintética significativamente superior aos da alfafa, comprovando que a redução da temperatura reduz a eficiência fotossintética do milho.

Para o sorgo, Hammer e Vanderlip (1989) não apenas comprovaram a diminuição da eficiência da radiação fotossinteticamente ativa interceptada, com a diminuição da temperatura de 25 para 17 °C, como também uma interação da temperatura com o híbrido utilizado. A análise da interação comprovou que existem híbridos que apresentam eficiência de uso mais homogênea, para o intervalo de temperatura estudado. Os efeitos de interações entre fatores estão entre os maiores obstáculos para o incremento de precisão nos modelos.

A temperatura noturna também afeta a eficiência de utilização da radiação solar pelo milho. Resultados do acompanhamento da eficiência de utilização da radiação, realizados por Major et al. (1991), acusaram a existência de redução da eficiência de uso da radiação fotossinteticamente

ativa devida a injúrias provocadas pela ocorrência de um período de baixas temperaturas noturnas.

➤ Ao relacionarem a eficiência de utilização da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada estimada e a radiação solar global média do período, Sinclair et al. (1992) demonstram que a eficiência de utilização da RFA é reduzida de forma quase linear em resposta ao aumento do total de radiação solar incidente. Este fato comprova uma das suposições que Kiniry et al. (1989) não conseguiram comprovar, de que o aumento da radiação solar global, quando próximo aos níveis de saturação da população, não consegue sustentar um incremento equivalente na eficiência de utilização da radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Nestas condições, os acréscimos nos níveis de fotossíntese líquida diminuem, chegando a zero no ponto de saturação luminosa. Neste mesmo experimento ocorreu variação da porção de radiação difusa, proporcionando variações da eficiência de utilização da RFA interceptada. As alterações de eficiência de utilização da radiação fotossinteticamente ativa interceptada, em diferentes condições do meio, resultaram de múltiplos fatores e de suas interações, sendo que o acompanhamento realizado não permitiu identificá-los com precisão. Porém, os resultados evidenciam que uma das causas da maior eficiência de utilização da RFA interceptada pelas plantas cultivadas em estufa, em relação às cultivadas a céu aberto, pode ser a maior porção de radiação difusa.

➤ Major et al. (1991) estimaram a eficiência de utilização da RFA absorvida a partir de leituras do espectro de radiação refletida pelas populações de plantas, em dois locais e três anos, testando o efeito de três diferentes densidades populacionais em dez híbridos de milho. A eficiência de utilização da RFA absorvida pelas plantas foi maior nas altas densidades de plantas, sendo estes resultados explicados pelo aumento do sombreamento de

folhas em altas densidades, evitando que estas estejam acima do seu ponto de saturação luminosa, como também foi observado por Sinclair e Horie (1989).

Esta conclusão é contestável pois, para Govil e Pandey (1998), o aumento da competição no milho em altas densidades diminui a eficiência fotossintética, causando a diminuição da taxa de crescimento relativo e da taxa de assimilação líquida. Esta aparente contradição de resultados é difícil de explicar com precisão, pois se confundem os efeitos devido aos diferentes níveis de observação, a forma de estimativa da radiação absorvida e das diferenças de intensidade de radiação solar entre os locais.

↳ Outro fator determinante da alta variabilidade da eficiência de uso da radiação solar é o efeito do estágio de desenvolvimento em que a planta se encontra. Tollenaar e Bruulsema (1988) observaram que a eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa absorvida diminui de 5,8 para 3,5% no período entre o máximo IAF e seis semanas após o início do enchimento de grãos. Este declínio é devido à redução do aparato fotossintético das folhas por ocasião da translocação do nitrogênio destas para os grãos.

Kiniry et al. (1998) avaliaram a eficiência de utilização da RFA pela cultura do milho em cinco locais, com grandes variações de déficit de pressão de vapor, observaram que a eficiência de utilização aumentou quando o déficit de pressão de vapor aumentou de 0,9 a 1,7 kPa. Os autores concluíram que estes resultados poderão auxiliar no entendimento das variações da eficiência de utilização da radiação solar, que ocorrem entre regiões produtoras.

↳ As afirmações de Bonhomme et al. (1982) de que, não havendo limitações do meio para a cultura, é possível caracterizar espécies de plantas pertencentes ao mesmo grupo metabólico por uma única curva de referência, que depende da capacidade da vegetação em interceptar energia e da eficiência dos processos de conversão de energia não são contestadas.

Apesar disso, estes processos têm sido estimados para cada cultura, constituindo compartimentos energéticos nos programas de simulação de crescimento e desenvolvimento da cultura, a partir de coeficientes próprios para cada cultura (Kiniry, 1989; Sinclair et Horie, 1989).

Apesar de algumas variações, o coeficiente de extinção e a fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa interceptada são coeficientes suficientemente robustos para comporem submodelos, dentro de modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura do milho, tal como o CERES-Maize. Já, a eficiência de uso da radiação solar interceptada ou absorvida apresenta uma maior variação, devido a inúmeros fatores, sendo necessário considerá-los na sua estimativa.

A participação dos modelos energéticos como submodelos para simulação do rendimento da cultura do milho é dependente da agregação de modelos para simulação de distribuição da matéria seca acumulada nas diferentes partes do vegetal, durante o seu ciclo de vida, assim permitindo também a estimativa do rendimento de grãos.

Donald (1962) sugeriu a utilização do índice de colheita multiplicado pela matéria seca aérea acumulada para estimar o rendimento de grãos, dando origem a uma série de trabalhos que utilizam esta relação. Contudo, com o avanço dos modelos de simulação, para períodos cada vez mais curtos, a alocação dos fotoassimilados passou a ser estimada para cada período do ciclo da cultura.

O índice de colheita, razão entre a matéria seca de grãos e a matéria seca total (ou aérea) da planta, varia com o genótipo do material, com as condições do ambiente e com a interação entre estes dois fatores. De acordo com resultados apresentados por Durães et al. (1993), os materiais de

milho mais precoces apresentaram os maiores índices de colheita para condições sem limitações ambientais.

Trabalhos de Goldsworthy e Colegrove (1974) e de Evans (1975), os quais compararam genótipos de milho de clima tropical e temperado, ainda são úteis para entender as variações existentes no índice de colheita potencial entre os genótipos de milho cultivados. Segundo estes autores, os genótipos de origem tropical apresentam maior porte e número de folhas, maturação tardia, pendão avantajado devido ao maior nível de dominância apical e, em consequência, menor índice de colheita. Plantas com essas características poderiam competir eficientemente com outras de rápido crescimento, bem como ser submetidas a significativas reduções de área foliar ocasionada por insetos e patógenos. Além disso, a maior quantidade de reservas de açúcares presentes no colmo de plantas de genótipo tropical, pode ser resultado da resistência à seca, da necessidade de auxílio efetivo no enchimento de grãos, bem como da tolerância a podridões da haste. Atualmente, genótipos tardios são os que mais se aproximam do milho original, tendo maior porte e número de folhas, sendo reduzida a alocação de recursos para os grãos, em comparação a genótipos precoces.

Fancelli (1989) salienta que resultados experimentais de índices de colheita não são reproduzidos em outros locais, devido ao efeito nutricional e climático, sendo que alguns elementos, como a temperatura e a radiação solar, não são controláveis ao nível de campo.

Apesar de haver um confundimento de fatores, quando são comparados índices de colheita de diferentes locais do globo, há um consenso de que ambientes de clima temperado de elevada latitude têm condições climáticas que resultam em uma maior alocação relativa de recursos aos grãos, obtendo índice de colheita de até 0,6. Este fato é explicado pela

presença de temperaturas amenas que prolongam o período de enchimento de grãos, permitindo uma adequada produção de recursos para encher os grãos.

A redução no índice de colheita potencial do milho entre locais deve-se, basicamente, a restrições do ambiente, tais como temperaturas diurnas acima de 35 °C, temperatura noturna acima de 24 °C e redução na radiação solar incidente. Entre as causas de reduções do índice de colheita, ao nível de campo, está a deficiência hídrica que, segundo Deloughery e Crookston (1979), apresenta variações em função do nível de deficiência hídrica aplicado à cultura, além de outros estresses aplicados durante o período de enchimento dos grãos, que podem levar a planta a reduzir o ciclo em função da redução de suprimento de sacarose das folhas para os grãos (Afuakwa e Crookston, 1984).

2.4. Curvas Potenciais

Considerando que os componentes do rendimento são um resultado da relação de oferta e demanda entre o meio e a população de plantas, Navarro Garza (1984) propôs que o conjunto de órgãos seja considerado em competição por fotoassimilados. A oferta é o resultado da quantidade de fotoassimilados produzidos durante o desenvolvimento, da qual são elaborados os componentes do rendimento, adicionados à parcela de reservas transitórias disponibilizadas. Por sua vez a demanda é representada pelo número de órgãos em crescimento, os quais são formados no período anterior.

A idéia de que os componentes do rendimento possuem uma forte correlação entre si sustenta a utilização de modelos potenciais para avaliar o desempenho de uma cultura ou de estimar o efeito de um estresse sobre o seu desempenho.

Fleury (1990) formaliza esta proposta, descrevendo que o valor do componente formado depende, em parte, das condições de crescimento da cultura durante a formação do mesmo e, em parte, do componente precedente por unidade de superfície (Figura 1). Além destas relações entre componentes do rendimento, existe uma forte influência do período de crescimento sobre o desempenho potencial dos estádios de desenvolvimento posteriores, pois é durante o crescimento que se define a de área foliar e o potencial de fotoassimilação. Navarro Garza (1984) estabeleceu uma relação entre o peso de matéria seca no florescimento, definido no período de crescimento, e o número potencial de grãos de milho, demonstrando que existe um incremento do número de grãos por planta quando há maior acúmulo de matéria seca, a partir de um peso mínimo necessário para a formação de um grão.



Figura 1. Relação entre componentes do rendimento sucessivos, segundo Fleury (1990).

O uso destas relações tem origem na descrição da correlação entre o peso da matéria seca acumulada até a floração e o número de grãos

produzidos, feita por Boiffin et al.¹, citados por Bertrandt (1991), a qual mostra-se apropriada para trabalhos de diagnóstico. Contudo, observaram-se variações na correlação entre anos e locais, que levaram Edmeandes e Daynard (1979) a procurar relações mais consistentes do número de grãos com a disponibilidade de fotoassimilados, ao invés do resultado produzido (matéria seca acumulada). Para isto, os autores estimaram o fluxo total de assimilados produzidos pela planta no dia de sua floração masculina, através de medições da fotossíntese de cada folha, em função de sua posição no dossel, relacionando-o com o número de grãos por espiga. Apesar da existência de relação, esta não tem precisão preditiva pois a redução ao nível fisiológico provocou a necessidade de reduzir a escala diária de tempo, e de planta de amostra, fazendo com que o componente produzido durante o início do período de enchimento de grãos fosse estimado pela relação entre a planta e o ambiente durante apenas um dia.

Aplicando a relação utilizada por Hawkins e Cooper² (1981), na qual o número de grãos é relacionado com a velocidade de crescimento da planta, por dia ou por grau-dia, Bertrandt (1991) conclui que a velocidade de crescimento durante a floração é um bom preditor do número de grãos, a partir de condições que se estabelecem para o abortamento de flores, salientando que este não é o potencial de flores fecundáveis.

↪ Partindo do pressuposto de que cada planta altera o número de grãos durante o seu ciclo de vida, em função das condições ambientais, Andrade (1993) conduziu experimentos com diferentes densidades de plantas

¹ BOIFFIN J.; SEBILLOTTE M.; COUVREUR F. Incidence de la simplification du travail du sol sur l'élaboration des rendements du blé et du maïs. In: **Simplification du travail du sol en production céréalière**, ITCF, Paris, 1976.

² HAWKINS R. C. & COOPER P. J. M. Growth, development and grain yield of maize. *Exp. Agric.* v. 17, p. 203-207, 1981.

e níveis de sombreamento de milho, com o objetivo de estudar a relação entre a quantidade de radiação interceptada pela população de plantas e o número de grãos produzidos. Os resultados demonstraram não ter sido possível prever o efeito da densidade de plantas sobre o número de grãos por planta através de modelos, pois não houve uma relação linear entre a radiação fotossinteticamente ativa acumulada e o número de grãos formados. Em densidades de plantas inferiores à ideal, o potencial genético de número de grãos por planta limita a formação de grãos por unidade de energia interceptada, enquanto que em densidades acima da ideal ocorre uma menor produção de grãos com uma quantidade de radiação interceptada relativamente semelhante à interceptada na densidade ótima. Isto foi atribuído ao gasto adicional em respiração para a manutenção da maior quantidade de matéria seca produzida, confirmando as afirmações já referidas de Kiniry et al. (1989), Major et al. (1991) e Sinclair et al. (1992). Contudo, os resultados permitiram identificar que, para atingir o potencial de número de grãos por planta, foi necessária a interceptação de 40 MJ por planta de radiação fotossinteticamente ativa até 15 dias após o florescimento, tendo uma produção potencial variando, entre os híbridos, de 460 a 740, com uma média de 550 grãos por espiga.

Admitindo-se que o número de grãos é determinado pelo número de flores fertilizadas e pela percentagem de abortamento de grãos, e que este é inversamente proporcional à quantidade de reservas deslocadas para as espigas logo após a fertilização, Kiniry e Knievel (1995) relacionaram o número de grãos de milho produzido com a radiação solar interceptada nos dez primeiros dias de enchimento de grãos. Estes autores verificaram que equações de regressão linear, com um patamar definido pelo potencial de

grãos por planta de cada híbrido, estabelecido a baixas densidades populacionais, podem ser funções de predição do número de grãos.

2.5. Efeito da deficiência hídrica

A deficiência hídrica é um dos principais fatores de perda de rendimento no milho, tendo efeitos variados sobre a planta, dependendo do estágio de desenvolvimento em que esta se encontra, do nível da deficiência e da sua duração.

A deficiência hídrica em uma planta ocorre quando a absorção de água pelas raízes é menor do que a perda por transpiração na parte aérea, provocando a desidratação dos tecidos. Desta forma, ela depende das áreas de interface que a planta possui com o solo e a atmosfera e, sobretudo, das condições de disponibilidade hídrica do solo e de demanda evaporativa da atmosfera (Nobel, 1983; Kramer e Boyer, 1991).

A ocorrência de deficiência hídrica no milho provoca uma redução no potencial da água nas folhas, no período de maior demanda evaporativa, sendo a reposição de água e o conseqüente aumento do potencial de água da folha mais lentos. Esta redução do potencial da água na folha estimula o fechamento estomático, reduzindo a condutância estomática em períodos cada vez maiores até, em casos de deficiência severa, durante todo o dia (Bergonci, 1997).

Outros processos fisiológicos e bioquímicos da planta também são alterados. Hsiao e Acevedo (1973) citam que a abertura estomática, a condutância do xilema, a assimilação de CO₂, o crescimento celular, a respiração e a fotossíntese apresentam variações a partir da redução do potencial da água nos tecidos. Estas alterações nos processos biológicos da

plata afetam o seu crescimento e distribuição dos recursos. Por isto, os modelos de simulação das culturas necessitam submodelos para simular a condição hídrica das plantas e os seus efeitos no desempenho destas.

O primeiro passo para estimar o efeito da deficiência hídrica consiste em diagnosticar quando ela ocorre. Segundo Bergonci (1997), o potencial mínimo da água na folha e a diferença de temperatura entre a folha e o ar são os melhores indicadores de déficit hídrico em milho, quando comparados ao potencial de base, condutância estomática e potencial da água no solo. Contudo, o potencial da água no solo mostrou forte influência no crescimento e desenvolvimento de plantas, podendo servir como critério indicado para avaliar o déficit hídrico em plantas e para o estudo das relações hídricas, quando relacionado com outros indicadores ligados à planta.

Tardieu e Bethenod (1990) avaliaram, durante três anos diferentes, indicadores de deficiência hídrica na cultura com o objetivo de verificar qual deles poderia explicar melhor as variações do rendimento do milho, com diferentes níveis de deficiência de água e compactação do solo, em parcelas experimentais, em potes e a campo. Os autores observaram que as características do estado hídrico do solo, feita pela medida do potencial matricial da água no solo a diferentes profundidades, ou pela avaliação da reserva útil, revelaram-se mal relacionadas com as variações de condutância estomática. Salvo em potes, onde existe um limite inferior impermeável e o sistema radicular está em condições adequadas de funcionamento, a condutância estomática é reduzida a partir de um potencial matricial de $-0,3$ MPa. Os autores acreditam que os erros de avaliação do estoque de água do solo estão ligados, principalmente, com a contribuição da camada não enraçada na alimentação hídrica das plantas, que, apesar da seca, proporcionou uma adequada condição hídrica.

Doorenbos e Kassam (1979) consideram que a deficiência hídrica tem efeito diferenciado, de acordo com o estágio de desenvolvimento em que a cultura se encontra. Para detectar estas variações, os autores adotaram a escala de desenvolvimento do milho proposta por Hanway (1963)¹, na qual o ciclo é dividido em: estabelecimento (15 a 25 dias), período vegetativo (25 a 40 dias), floração (15 a 20 dias), formação da colheita (35 a 45 dias) e maturação (10 a 15 dias). Eles também quantificaram o efeito da deficiência de água sobre o rendimento potencial (Y_b), permitindo estimar o rendimento real (Y_a) através de um fator de efeito sobre o rendimento (k_y), que corresponde ao coeficiente angular da reta que relaciona a diminuição do rendimento relativo ($(1 - Y_a/Y_b)$) com a deficiência hídrica relativa ($(1 - E_{Tr}/E_{Tm})$). Os déficits de água podem ocorrer em cada um dos distintos períodos de desenvolvimento e a sua magnitude se refere ao déficit em relação às necessidades de água da cultura em um determinado estágio de desenvolvimento. Os resultados mostram ainda que as maiores reduções no rendimento ocorrem quando a deficiência se dá durante a floração, quando o valor de k_y é de 1,5, indicando que cada 10% de deficiência hídrica relativa neste período de desenvolvimento da cultura produzirá uma queda de 15% no rendimento potencial. Os demais estágios de desenvolvimento apresentaram os seguintes fatores de efeito sobre o rendimento (k_y): 0,5 no enchimento de grãos; 0,4 no período vegetativo e 0,2 na maturação.

Contudo, estes valores não são constantes dentro de um mesmo estágio de desenvolvimento devido às variações genéticas dos híbridos, à época de ocorrência e à duração do estresse, como foi observado por Thévenet et al. e por Doorenbos et al., citados por Plantureux et al. (1990), os

¹ HAWWAY, J. J. Growthstages of corn (*Zea mays* L.). *Agronomy Journal*, Madison. 1963, n.5. p.487-492.

quis encontraram valores do fator de efeito sobre o rendimento (k_y) de 1,75, 1,2 e 1,48, para diferentes híbridos durante o período de enchimento de grãos.

As relações entre o consumo real de água pelas plantas e a sua demanda hídrica são largamente utilizadas para estudar o efeito de deficiência hídrica sobre o desempenho vegetal. Matzenauer (1995) observou que o consumo relativo de água (ET_r/ET_m) é a variável mais eficiente para indicar as variações de rendimento de grãos de milho entre épocas de semeadura, anos e locais no Estado do Rio Grande do Sul. O consumo relativo de água é representado pela razão entre a evapotranspiração real (ET_r) e a evapotranspiração máxima (ET_m).

O modelo CERES-Maize estima as principais funções da planta por meio de coeficientes de estresse hídrico, calculados a partir da simulação do balanço hídrico do solo e da estimativa das necessidades da cobertura vegetal. Plantureux et al. (1990) ressaltam a necessidade do modelo de simulação considerar o efeito da deficiência hídrica sobre o desenvolvimento da planta, pois o efeito sobre o rendimento é dependente do nível de estresse e do período dentro do ciclo da cultura em que este ocorre.

As correções que devem ser estabelecidas nos modelos de simulação de uma cultura são diversas e dependem do estágio de desenvolvimento em que a cultura se encontra, podendo ter reflexos nos períodos subsequentes, devido ao nível de demanda de um estágio ser estabelecido no estágio anterior. Deficiências no início de enchimento de grão, por exemplo, provocam redução no número de grãos abortados. Esta redução de drenos provoca uma modificação na distribuição dos recursos, que aumentarão o peso de colmo por falta de drenos na espiga (Classen e Shaw, 1970).

Deficiências hídricas no período de crescimento da cultura do milho reazem o alongamento das folhas. Contudo, em deficiências de curta duração o tamanho final da folha não é afetado, pois, quando a deficiência é suprimida, o crescimento é retomado, desde que as células ainda não estejam com as paredes enrijecidas. Desta forma, períodos longos de intenso estresse hídrico provocam a redução da área foliar do milho (Acevedo et al., 1971 e 1979; Noel, 1983).

Além da distribuição dos recursos ser modificada pela deficiência hídica, o nível de fotoassimilados produzidos também é reduzido pela diminuição na taxa fotossintética, a qual é afetada pela diminuição da condutância estomática que, por sua vez, limita o fluxo de CO_2 pelos estômatos, além da redução da área foliar (Krieg, 1983). Este efeito é considerado nos modelos pela redução na eficiência de uso da radiação fotosinteticamente ativa interceptada, como foi comentado anteriormente, e pela redução na interceptação desta radiação devido à menor área foliar da cultura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A base de dados para o presente estudo foi obtida de um conjunto de seis experimentos conduzidos em Eldorado do Sul – RS durante os anos agrícolas de 1993/94 a 1998/99 e mais um experimento conduzido em Ijuí – RS em 2001. Os experimentos de 1993/94 e 1994/95 foram conduzidos pelo professor João Ito Bergonci, de 1995/96 por Solange França, em 1996/97 por Beradete Radin e o experimento em Ijuí em conjunto com a professora Sarra Vienci Fernandes, aos quais agradeço a cedência dos resultados.

3.1. Caracterização dos experimentos conduzidos em Eldorado do Sul

3.1.1. Solo e clima

Foram conduzidos experimentos na Estação Experimental Agrônoma da UFRGS, localizada no município de Eldorado do Sul (latitude 30°5'22"S longitude 51°39'08"W e 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, sendo que 425 mm estão 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, sendo que o mês de maior fluxo de radiação global é dezembro, com média de 26,0 MJm⁻² di⁻¹ (Bergamaschi e Guadagnin, 1990).

O relevo da área experimental é plano e o solo é classificado como um ARCISSOLO VERMELHO Distrófico típico (EMBRAPA, 1999), apresentando horizonte B textural típico.

3.1.2. Delineamento Experimental

Os experimentos foram conduzidos em uma área homogênea de 90 X 60 m, para que houvesse bordaduras em todos os quadrantes. Devido ao emprego de um sistema de aspersão em linha, que não permitiu a casualização do fator água, o experimento foi estruturado em blocos com tratamentos em faixa. Junto à linha de aspersores, o nível de irrigação foi ajustado de modo a manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo. As doses de rega eram reduzidas quanto mais distante da linha de aspersores até atingir o nível zero de suplementação hídrica.

Um sistema de irrigação foi instalado no centro da área experimental, na direção este-oeste, acompanhando as linhas de semeadura. Os aspersores foram instalados a uma altura de 3 m e espaçados em 6 m ao longo da linha (metade da distância indicada para os aspersores), visando dar maior homogeneidade longitudinal dentro de cada faixa, e criar níveis contrastantes de doses de irrigação altas, intermediárias e baixas.

O sistema de irrigação separava o experimento em duas partes iguais, com a mesma distribuição de blocos e tratamentos. A área norte foi utilizada para as amostragens, no acompanhamento do desenvolvimento da cultura e dos balanços de radiação fotossinteticamente ativa. Na metade sul foi

feita a instalação dos demais equipamentos, bem como a determinação do rendimento final.

Cada metade da área experimental constava de cinco blocos, perpendiculares à linha de irrigação e às faixas dos níveis de irrigação. As parcelas constavam de quatro fileiras de milho com 3 m de largura e 16 m de comprimento, tendo como área útil duas linhas centrais, perfazendo 1,5 m de largura e 4 m de comprimento.

Os tratamentos constaram de diferentes níveis de irrigação, sendo que nos cinco primeiros anos o sistema utilizado foi de uma linha de aspersores, conforme já descrito (Figura 2a). No último ano (1998/99), foram instaladas duas linhas de aspersores distanciadas de 6 m, e localizadas entre o maior nível de irrigação (I5), entre as duas linhas de aspersores e o imediatamente inferior (Figura 2b). Desta forma, inseriu-se mais um nível de irrigação e obteve-se outro nível próximo da meia dose de I5, denominado de 3. Os níveis dos tratamentos foram aferidos através de coletores, cujos resultados são apresentados no Apêndice 1. A dose inteira foi considerada aquela que manteve a umidade do solo próxima à capacidade de campo. Os demais níveis de irrigação são frações da dose inteira, conforme o Apêndice 1.

As datas e lâminas de irrigação aplicados, no tratamento dose inteira de irrigação, estão no Apêndice 2.

Nos quatro primeiros anos o controle de irrigação foi realizado pelo acompanhamento do armazenamento de água em lisímetro de pesagem, instalado no centro da parcela de dose máxima de irrigação no bloco central da metade norte (Figuras 2a e 2b). Nos dois últimos anos foi feito acompanhamento do potencial matricial da água no solo, através de tensômetros instalados a 1,5 m da linha de aspersores (no centro da parcela com maior dose de irrigação), procurando-se manter a umidade do solo na capacidade de campo.

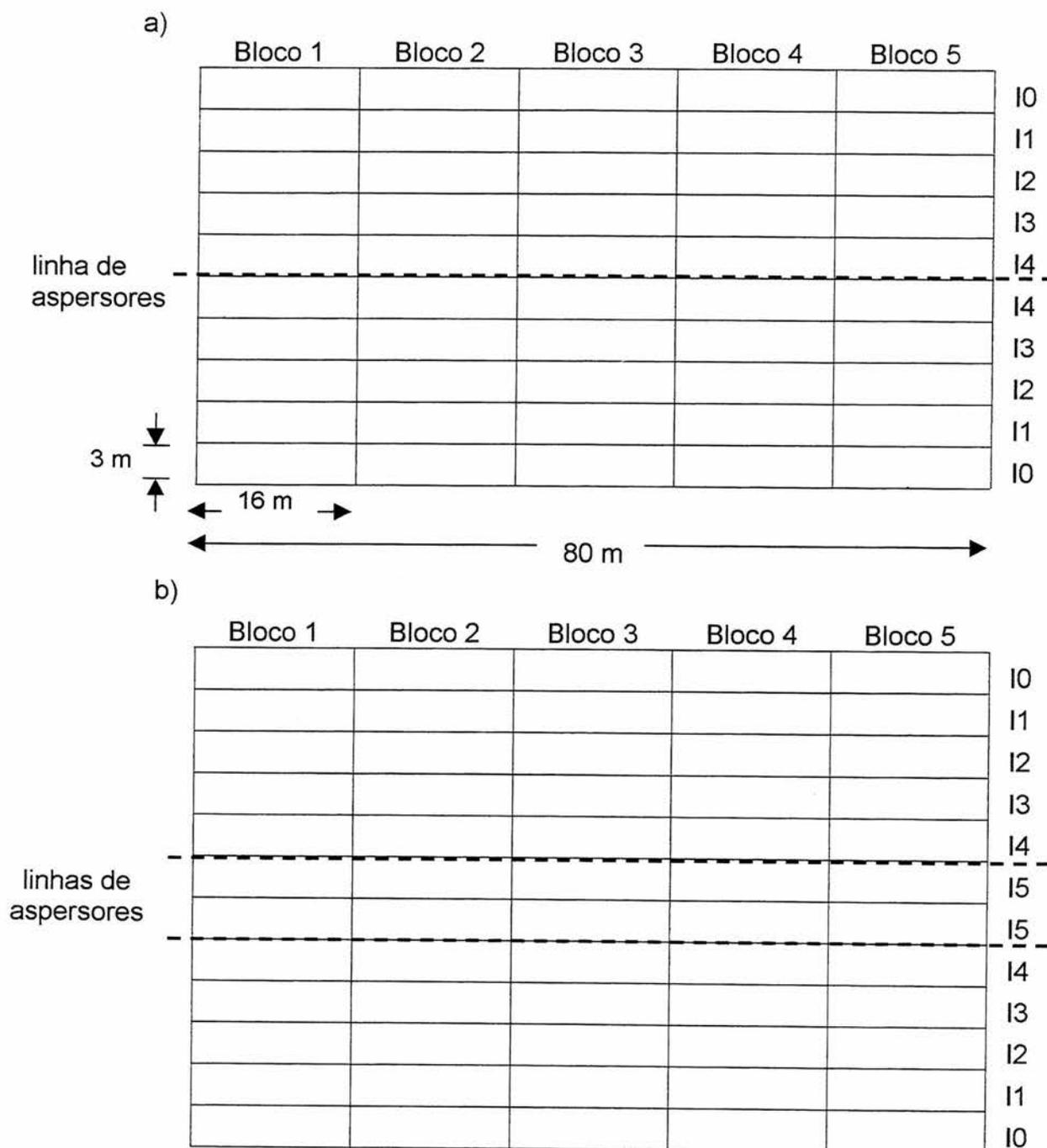


Figura 2. Distribuição dos blocos, tratamentos e linhas de aspersores para irrigação, nos anos de 1993/94 a 1997/98 (a) e 1998/99 (b). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

3.1.3. Manejo da Cultura

Manteve-se o manejo da cultura o mais homogêneo possível, durante os seis anos de condução dos experimentos. Contudo, as variações ambientais, muitas vezes, exigiram alguns ajustes para manter as condições de experimentação em níveis adequados, para que não houvesse outro fator limitante da produção potencial, além do fator hídrico. Um resumo destas adequações está sintetizado no Apêndice 3, sendo os principais aspectos descritos a seguir, juntamente com as demais técnicas culturais utilizadas.

O antecedente cultural de inverno, nos dois primeiros anos, foi a aveia preta (*Avena strigosa*). Porém, para aumentar a velocidade de decomposição da resteva e aumentar a contribuição desta em termos de nitrogênio para o milho, nos demais anos, foi introduzido o consórcio aveia preta-ervilhaca (*Vicia sativa*). A incorporação da cultura de inverno foi feita por aração, seguida de gradagem na primeira quinzena de outubro, com pequenas variações quando as condições resultantes não foram as ideais para a semeadura, conforme o Apêndice 3.

A correção da acidez do solo foi realizada mediante incorporação de calcário dolomítico nos anos de 1988, 1989 e 1994, quando foram incorporadas 5, 2 e 4 t ha⁻¹, respectivamente. As adubações foram baseadas em análises de solo, realizadas previamente, e mantiveram-se nos níveis de 150 Kg ha⁻¹ de P₂O₅, 120 Kg ha⁻¹ de K₂O e 40 Kg ha⁻¹ de N₂ na adubação de base.

As adubações de nitrogênio em cobertura tiveram variações para que o milho ficasse menos dependente das contribuições do antecedente cultural. Nos dois primeiros anos duas aplicações foram efetuadas, quando as plantas apresentavam de 40 a 60 cm de altura e no aparecimento da folha bandeira, enquanto que do terceiro ao sexto ano estas aplicações foram feitas com 4 e 8 folhas totalmente expandidas. As doses de nitrogênio aplicadas em cobertura

foram de 40 + 40 Kg ha⁻¹ de N₂ (1993/94 e 1994/95), 40 + 60 Kg ha⁻¹ de N₂ (1995/96 a 1997/99) e 60 + 60 Kg ha⁻¹ de N₂ (1998/99).

O controle de pragas foi realizado apenas quando foi diagnosticada a sua necessidade, através da aplicação de produtos químicos recomendados e disponíveis (Apêndice 3).

O controle de plantas daninhas foi efetuado preventivamente com produtos pré-emergentes. Controles complementares foram necessários em alguns anos, como pode ser verificado no Apêndice 3. É importante salientar que, no ano agrícola de 1998/99, não foi eficiente o controle preventivo, o que exigiu o uso do pós-emergente nitrosulfuron, que tem um mecanismo de morte da planta em 7 a 21 dias após a aplicação, e posteriormente de paraquat, direcionado ao solo, na entre linha. Por isto, não foi possível a aquisição dos dados para o balanço de radiação fotossinteticamente ativa da cultura, no período de instalação da cultura e início do crescimento.

A semeadura foi sempre realizada no período de final de outubro ou início de novembro (Apêndice 3), visando coincidir o máximo índice de área foliar do milho com a maior incidência de radiação global, da segunda quinzena de dezembro à primeira quinzena de janeiro.

O híbrido utilizado nos primeiros quatro anos foi o Pioneer 3230, sendo substituído pelo Pioneer 3063 nos dois últimos anos, assim mantendo as características de híbrido triplo de ciclo precoce.

3.1.4. Dados meteorológicos

Os dados de radiação solar global, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação pluvial foram registrados e disponibilizados em intervalos de 15 minutos, por uma estação automática modelo W2000 (Campbell Scientific), localizada junto ao experimento.

3.2. Caracterização do experimento conduzido em Ijuí

Um experimento complementar foi conduzido no Instituto Regional de Desenvolvimento Rural (IRDeR), localizado no município de Augusto Pestana (latitude 28° 23' 17" S, longitude 53° 54' 50" W e altitude de 448 m), na região ecoclimática Missioneira do Rio Grande do Sul, no ano agrícola de 2000/2001.

A média de precipitação anual da região é de 1636 mm, sendo que destes 653 mm estão concentrados no período de fevereiro a junho, que abrange o período experimental, da emergência à maturação fisiológica da cultura. A média anual de evapotranspiração de referência é de 1369 mm, sendo 474 mm no período de fevereiro a junho (IPAGRO, 1979, 1989).

O solo predominante é classificado como LATOSSOLO VERMELHO distroférico típico, que se caracteriza pela coloração vermelha escura, pelo perfil profundo, boa drenagem natural e predominância de argilas 1:1 (EMBRAPA, 1999).

O experimento foi conduzido em blocos ao acaso, constituído de três repetições e seis tratamentos, oriundos da combinação dos níveis de dois fatores. Os fatores avaliados foram: a dose de nitrogênio em cobertura, com dois níveis (zero e 200 Kg N.ha⁻¹), e a densidade de plantas, com três níveis (4, 7 e 10 plantas.m⁻²).

O espaçamento foi de 0,7 m entre linhas e 0,14; 0,20 e 0,36 m entre plantas na linha, para os níveis do fator densidade de 10, 7 e 4 plantas.m⁻², respectivamente.

As parcelas tinham dimensões de 4 m de comprimento e 4,2 m de largura (6 linhas), sendo considerados como área útil 8,4 m², após descontadas bordaduras de 1 m nas extremidades (0,5 m de cada lado) e uma linha em cada lateral.

A adubação foi baseada na análise de solo, sendo aplicados 150 Kg.ha⁻¹ da fórmula 5-18-23, por ocasião da semeadura em 21/02/2001. A

adubação de cobertura foi realizada quando as plantas tinham cinco folhas completamente expandidas, de acordo com os níveis do fator nitrogênio.

O híbrido utilizado foi o Cargill 855, híbrido triplo superprecoce de grãos semiduros. O sistema de preparo do solo constou de uma escarificação seguida de gradagem. O controle de plantas daninhas foi realizado através de capina.

Neste experimento foi medida a massa de matéria seca acumulada na parte aérea do milho, em quatro momentos do ciclo: após a instalação da cultura (quando a cultura já dispõe de quatro folhas expandidas), no florescimento (quando mais de 75% das plantas apresentam os estigmas e existe a liberação de pólen), durante o enchimento de grãos (aproximadamente 30 dias após o florescimento) e próximo do início da rápida senescência (quando as folhas medianas começaram a secar). Na última amostragem também foi determinado o número de grãos formados por espiga.

O objetivo deste experimento é de aumentar a variabilidade de velocidade de crescimento da cultura, para melhorar o ajuste da relação potencial entre o número de grãos formados por espiga e a velocidade de crescimento no início do enchimento de grãos. Isto foi necessário, pois, nos anos em que as menores doses de irrigação causaram diminuição da velocidade de crescimento, ocorreram também deficiências hídricas no florescimento, podendo interferir na eficiência de polinização o que impossibilita a obtenção de uma relação influenciada somente pela velocidade de crescimento no período de enchimento de grãos. Neste sentido, tanto a deficiência de nitrogênio como a competição, intra-específica, por luz são mais adequadas, pois podem reduzir a velocidade de crescimento da cultura sem causar alterações no processo de polinização, como no caso da deficiência hídrica.

3.3. Determinações nos experimentos de Eldorado do Sul

3.3.1. Potencial da água no solo

O potencial da água no solo foi medido através de tensiômetros de coluna de mercúrio, cujas leituras de altura da coluna de mercúrio foram transformadas em potencial matricial da água do solo, pela equação:

$$\Psi_m = (-12,6 H + hc + z) 0,0001 \quad [1]$$

Sendo Ψ_m o potencial matricial da água no solo (MPa), H a leitura da altura da coluna de mercúrio acima da cuba (cm), hc a altura média do mercúrio (na cuba) em relação à superfície do solo (cm) e z a profundidade do centro da cápsula porosa do tensiômetro (cm).

Nos dois primeiros anos, nos tratamentos I0, I1, I2 e I3 foram instalados tensiômetros nas profundidades de 0,15; 0,30; 0,45 e 0,60 m, enquanto no I4 a 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 0,90; 1,05 e 1,20 m de profundidade. A partir de 1995/96 foram acrescentados tensiômetros nas profundidades de 0,75 e 0,90 em I0. As leituras dos tensiômetros foram feitas em freqüências variáveis, mas, no mínimo, uma por semana.

3.3.2. Transpiração das plantas

Seguindo metodologia descrita por Santos (1998), foram utilizados sensores de temperatura a distâncias conhecidas de uma fonte de pulso de calor, para medição direta da velocidade da seiva no caule das plantas, que, em períodos de um dia, se aproxima da perda de água por transpiração. A equação que permite esta estimativa é:

$$Tr = V(t_0, t_m) FC \frac{d_a^2 \pi}{4} \quad [2]$$

sendo Tr a transpiração da planta ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$), FC o fator de calibração que caracteriza a área efetiva de condução de seiva na secção do caule e

estimado em 1,51 por Santos (1998), d_a o diâmetro do caule e $V(t_0, t_m)$ a velocidade da seiva entre a fonte e o sensor, que é estimada por:

$$V(t_0, t_m) = \frac{\sqrt{x^2 - 4k_a t_m}}{t_m} \quad [3]$$

sendo x a distância entre a fonte de calor e o sensor a montante, k_a a difusividade térmica do tecido condutor e t_m o tempo que a onda de calor necessita para percorrer a distância entre a fonte e o sensor a montante.

3.3.3. Desenvolvimento e crescimento da cultura

Foram determinadas as datas em que ocorreram as principais fases do desenvolvimento da cultura: a emergência, o florescimento e a maturação fisiológica.

Foi realizado 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. Estas determinações foram realizadas a partir de amostras de quatro plantas por unidade experimental, que foram retiradas semanalmente a partir da emergência até o diagnóstico visual da maturação fisiológica, perfazendo um total de 17 a 19 amostragens durante o ciclo da cultura.

Estas determinações foram realizadas em todos os níveis do fator dose de irrigação, nos dois primeiros anos, nos níveis I4 (irrigação integral) e I0 (não irrigado) nos anos 1995/96 e 1996/97, nos níveis I4, I2 e I0 em 1997/98 e nos níveis I5, I2 e I0 no ano de 1998/99.

3.3.4. Graus-dia acumulados

A estimativa dos graus-dia acumulados após a emergência da cultura foi obtida mediante a equação:

$$GD = \bar{T} - T_b \quad [4]$$

sendo \bar{T} a temperatura média do dia, medida na estação automática com o sensor a 2 m acima de solo gramado, e T_b a temperatura base inferior para o milho de 8°C, segundo Berlato e Sutili (1976) e Kiniry (1991).

3.3.5. Índice de Área Foliar

As amostragens semanais de quatro plantas por parcela também serviram para a determinação do índice de área foliar, sendo este calculado de acordo com a seguinte equação:

$$IAF = \frac{AF}{S} \quad [5]$$

Sendo AF a área foliar, calculada através 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.

3.3.6. Componentes do balanço de radiação fotossinteticamente ativa (RFA)

Nos níveis de irrigação I0 e I5 foram instalados conjuntos de nove barras contendo sensores de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), sendo cinco delas colocadas a 0,05 m de altura do solo medindo a parcela de RFA transmitida pela cultura (RFA_t). Outras duas barras foram colocadas na mesma altura, porém invertidas, medindo a RFA refletida pelo solo (RFA_{rs}), uma barra ficou situada sobre a cultura, a 3,5 m de altura do solo, medindo a RFA incidente (RFA_{inc}) e outra foi instalada na mesma altura, porém invertida,

medindo a RFA refletida pelo conjunto solo-cultura (RFA_{rsc}). Esta distribuição permitiu a estimativa de todos componentes do balanço de RFA da população.

As barras continham de cinco a sete sensores de silício amorfo e estavam conectadas a um sistema de registro "Campbell CR10", que continha uma unidade armazenadora de dados. As leituras ocorriam a cada 15 s e os seus valores médios foram registrados a cada 15 min. As barras foram instaladas no dia 11 de dezembro de 1999, quando as plantas estavam com a oitava ou nona folha expandida.

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

$$RFA_{int} = RFA_{inc} - RFA_t \quad [6]$$

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

$$RFA_a = RFA_{inc} + RFA_{rs} - RFA_{rsc} - RFA_t \quad [7]$$

3.3.7. Rendimento de grãos e seus componentes

Os componentes do rendimento de grãos foram avaliados a partir de amostragens realizadas por ocasião da colheita do experimento, seguindo a seguinte metodologia:

a) Foram medidos 10 m nas duas linhas centrais de cada parcela, onde foram contados o número de plantas e o número de espigas, para estimar os componentes número de plantas por metro quadrado ($pl.m^{-2}$) e número de espigas por planta ($esp.pl^{-1}$).

b) Desta área foram coletadas as 10 primeiras espigas de uma das fileiras, para contar o número de grãos por espiga ($gr.esp^{-1}$).

c) Uma amostra de aproximadamente 1000 g de grãos (úmidos) foi pesada, seca em estufa a 70°C e novamente pesada, para estimar a umidade média dos grãos.

d) Desta amostra seca foram contados 500 grãos e pesados, para determinar o peso médio de grãos secos e estimar o peso médio de grãos a 13% de umidade.

e) Da área inicial, foram colhidas as espigas remanescentes, das quais foram debulhados e pesados os grãos (úmidos) para, juntamente com os dados das 10 espigas amostradas, estimar o rendimento de grãos a 13% de umidade.

3.3.8. Estimativa das deficiências hídricas

Para a determinação da deficiência hídrica foi utilizado o balanço hídrico ao nível diário adaptado de thornthwaite e Mather (1955), sendo a deficiência obtida pela diferença entre a evapotranspiração máxima (ET_m) e a evapotranspiração real (ET_r).

A evapotranspiração máxima foi estimada pela multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo o coeficiente de cultura (K_c), estimado através da equação obtida por Radin (1998), no mesmo experimento, e apresentado por Bergamaschi et al. (2001):

$$K_{c_{est}} = 0,723 + 0,1IAF_{est} \quad [8]$$

O índice de área foliar (IAF_{est}) foi o estimado ao nível diário por um modelo linear segmentado, ajustado em função de graus-dia acumulados, para a cultura sem limitação hídrica, sendo adicionados dois segmentos lineares, um para o período de instalação e outro para o período de rápida senescência.

Nos demais tratamentos, onde ocorrem limitações hídricas, o IAF foi estimado por equações lineares segmentadas, ajustadas para cada ano e tratamento.

A evapotranspiração de referência foi estimada pela equação de Penman (1948):

$$ET_o = \frac{\left[\left(\frac{s}{\gamma} \right) \left(\frac{R_n}{59} \right) + Ea \right]}{\left[\left(\frac{s}{\gamma} \right) + 1 \right]} \quad [9]$$

sendo s o coeficiente angular da curva que relaciona pressão de saturação de vapor d'água e temperatura do ar, γ o coeficiente psicrométrico, Ea o termo aerodinâmico e R_n o saldo de radiação estimado a partir da radiação solar global (R_g), pela equação obtida por Bergamaschi e Guadagnin (1990):

$$R_n = -18,81 + 0,69R_g \quad [10]$$

O termo aerodinâmico (Ea), foi estimado pela seguinte equação:

$$Ea = 0,35(e_s - e)(0,5 + 0,01U_2) \quad [11]$$

sendo U_2 a velocidade do vento a 2 m acima da superfície do solo ($\text{milhas} \cdot \text{dia}^{-1}$) e $(e_s - e)$ o déficit de saturação de vapor d'água do ar (mmHg).

A evapotranspiração real (ET_r) foi estimada pela equação:

$$ET_r = P + I - \Delta t \quad [12]$$

sendo P o total de precipitação pluvial diária, I o total de irrigação diária e Δt a alteração de armazenamento de água no solo na profundidade explorada pelas raízes. A alteração do armazenamento de água do solo foi estimada pela diferença entre o armazenamento do dia considerado e do dia anterior.

Quando o solo estava com um saldo diário negativo entre a entrada e a saída de água do sistema solo-planta ($P+I-ET_m < 0$), o armazenamento foi estimado pela equação:

$$Arm = CAD \cdot \exp(-NegAc / CAD) \quad [13]$$

sendo CAD a capacidade de água disponível que o solo consegue armazenar e $NegAc$ o negativo acumulado, que representa a deficiência pluviométrica acumulada no sistema, estimada quando $P+I-ET_m$ é menor do que zero, por:

$$NegAc = \sum (P + I - ET_m) \quad [14]$$

Quando $P+I-ET_m$ é maior do que zero o seu valor é somado ao armazenamento de água no solo até este atingir a CAD , sendo o restante considerado excesso hídrico. Neste caso, o saldo negativo acumulado é estimado por:

$$NegAc = CAD \cdot \ln(Arm / CAD) \quad [15]$$

Durante o período de crescimento radicular foram necessários ajustes aos cálculos acima descritos. Em função do aprofundamento do sistema radicular foi acrescentado à CAD o respectivo armazenamento de água que cada camada adicional de solo ocasionava para, finalmente, estimar um novo saldo negativo acumulado pela equação descrita.

A CAD estimada ao nível diário, considerando os seus acréscimos, durante o período de aprofundamento do sistema radicular, foi obtida pela equação:

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{mp}) \cdot z \quad [16]$$

sendo θ_{cc} a umidade volumétrica do solo com potencial matricial de capacidade de campo (-0,0023 Mpa), segundo Leguizamón Rojas (1998), θ_{mp} a umidade volumétrica do solo com potencial matricial de ponto de

murcha permanente ($-1,5$ Mpa) e z a profundidade de solo explorada pelo sistema radicular (mm).

As umidades do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, bem como toda a curva de retenção de água no solo, foram determinadas em amostras de solo não deformado, retiradas a 0,15; 0,30; 0,45 e 0,60 m de profundidade, com quatro repetições (Apêndice 4).

A partir das determinações das curvas de retenção de água no solo por camada, a CAD também foi determinada para cada camada e, após, realizado o somatório das camadas exploradas pelo sistema radicular do milho.

Para a estimativa da CAD ao nível diário foi adequada do modelo de simulação da profundidade do sistema radicular adotado por Faria e Madramootoo (1996) para o trigo, em que o aprofundamento do sistema radicular é uma função linear do acúmulo de graus-dia, a partir da emergência das plântulas e estabiliza no florescimento, quando o sistema radicular atinge a profundidade máxima.

A utilização de sensores de umidade e de potencial da água do solo para estimar a quantidade de entrada e saída de água é bem difundido, como nos trabalhos de Van Genuchten (1980), Clausnitzer & Hopmans (1994) e Coelho & Or (1996). Segundo Molz (1981), existe relação entre a distribuição do sistema radicular do milho e a retirada de água do solo. Considerando estas afirmativas como pressupostos, o aprofundamento do sistema radicular foi estimado através do acompanhamento das tensões da água nas diferentes profundidades, durante períodos de baixa precipitação, e a profundidade máxima do sistema radicular considerada como sendo próxima à profundidade das cápsulas dos tensiômetros que indicavam alterações no potencial de água no solo por ocasião do florescimento da cultura.

A profundidade do sistema radicular foi, então, estimada por uma relação linear com os graus-dia acumulados após a emergência, na forma de:

$$z = z_{ini} + GDac.Ap \quad [17]$$

sendo z_{ini} a profundidade do sistema radicular por ocasião da emergência (considerada 0,1 m), $GDac$ os graus-dia acumulados após a emergência e Ap o acréscimo de profundidade por unidade de graus-dia até o florescimento, que foi calculado pela mesma equação a partir da profundidade máxima do sistema radicular e dos graus-dia necessários para atingir o florescimento.

O efeito das deficiências hídricas estimadas sobre o desempenho potencial da cultura foi avaliado considerando a fase em que a cultura se encontrava, devido a isto estas deficiências foram calculadas para cada etapa do desenvolvimento da cultura. Para relacionar com o desempenho potencial da cultura foram estimadas a fração da demanda hídrica da cultura que é consumida ($Cons Rel$) e que não é fornecida ($Def Rel$), para cada período de desenvolvimento da cultura, obtidos da seguinte forma:

$$Cons Rel = \frac{ETr}{ETm} \quad [18]$$

sendo denominada consumo de água relativa ou, simplesmente, ETr/ETm ;

$$Def Rel = 1 - \frac{ETr}{ETm} \quad [19]$$

sendo denominada, a seguir, deficiência hídrica relativa.

3.4. Ajuste de Modelos

3.4.1. Modelo do índice de área foliar

O índice de área foliar foi estimado em função de graus-dia acumulados através do ajuste de um modelo linear segmentado, proposto por Brisson et al. (1990), para o período de maior uso da radiação, que vai da instalação da cultura até o início de rápida senescência foliar. Foram utilizados, neste ajuste, os resultados de IAF e temperatura dos anos agrícolas de

1993/94 e 1995/96, evitando o uso do ano de 1994/95, que teve o índice de área foliar do milho reduzido por um vendaval. Os demais anos foram utilizados para a verificação do modelo, avaliando-se a possibilidade de generalização para outro híbrido e ambiente, durante o período de instalação.

O efeito do déficit hídrico foi avaliado relacionando os coeficientes ajustados no modelo com as deficiências hídricas relativas, estimadas para os períodos representados pelos segmentos do modelo.

3.4.2. Modelo energético

As eficiências de interceptação e de absorção da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura foram estimadas a partir das parcelas interceptadas e absorvidas (RFA_{int} e RFA_a), calculados pelas equações 6 e 7, e do total incidente sobre o dossel (RFA_{inc}):

$$\varepsilon_{int} = \frac{RFA_{int}}{RFA_{inc}} \quad [20]$$

$$\varepsilon_{abs} = \frac{RFA_a}{RFA_{inc}} \quad [21]$$

Os resultados das eficiências de interceptação da RFA foram relacionados com a evolução do IAF para estimar o valor do coeficiente de extinção da população de plantas. Esta estimativa foi efetuada pelo ajuste do coeficiente angular b da equação:

$$\ln(1 - \varepsilon_{int}) = -b.IAF \quad [22]$$

sendo ε_{int} a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, b o coeficiente angular da equação (inclinação da reta), que estima do coeficiente de extinção e IAF o índice de área foliar estimado em função de graus-dia acumulados.

A verificação dos coeficientes obtidos no ajuste dos dados ao modelo energético originário do trabalho de Monsi e Saeki (1953) e utilizado por Gosse et al. (1986), não pôde ser realizado devido à falta de dados independentes. Contudo, a precisão da estimativa dos parâmetros foi considerada um indicativo de sua aceitação, visto que a adequabilidade do modelo não precisa ser avaliada por este ser amplamente utilizado e com eficiência.

O peso acumulado da matéria seca da parte aérea foi ajustado a uma equação linear com a RFA interceptada acumulada, cujo coeficiente angular (inclinação) representa a eficiência com que a população de plantas transforma a energia fotossinteticamente ativa interceptada em biomassa constituinte da parte aérea, conhecida por eficiência de uso da RFA_{int} .

As variações da eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo milho são maiores do que as variações existentes nos demais coeficientes do modelo. Desta forma, para avaliar o efeito da deficiência hídrica sobre as taxas de acúmulo de matéria seca nos diferentes anos e tratamentos, admitiu-se que esta variação é promovida pelas alterações na eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada e no índice de área foliar da cultura, sendo desprezadas as variações devidas a alterações no coeficiente de extinção.

Como o IAF foi estimado pelo modelo linear segmentado, para os diferentes anos e tratamentos avaliados, a eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pôde ser estimada e relacionada com a deficiência hídrica relativa.

Para possibilitar a estimativa do rendimento de grãos, através do modelo energético, o índice de colheita (IC) foi estimado, para cada tratamento e ano, seguindo a equação:

$$IC = \frac{MS_{gr}}{MS_{pa}} \quad [23]$$

sendo MS_{gr} o peso de matéria seca de grãos (g) e MS_{pa} o peso de matéria seca da parte aérea da cultura acumulada durante o ciclo da cultura.

Este índice foi relacionado com a deficiência hídrica relativa.

3.4.3. Modelo de elaboração do rendimento do milho

O potencial de grãos formados, segundo o modelo de elaboração do rendimento, é estimado por:

$$rend = pl.m^{-2}.esp.pl^{-1}.gr.esp^{-1}.\bar{p}gr.10 \quad [24]$$

sendo $rend$ o rendimento de grãos estimado, $pl.m^{-2}$ o número de plantas por metro quadrado de superfície, $esp.pl^{-1}$ o número de espigas por planta, $gr.esp^{-1}$ o número de grãos por espiga, $\bar{p}gr$ o peso médio dos grãos, e 10 o fator de conversão do rendimento, de $g.m^{-2}$ para $Kg.ha^{-1}$.

A relação entre cada componente do rendimento em formação e o componente formado anteriormente é estimador da relação planta-meio do período em que o componente estava sendo formado. Devido a isto, foram relacionados os componentes do rendimento, procurando estimar a curva potencial, que representa o desempenho máximo da cultura na etapa de desenvolvimento em que cada componente estava sendo formado.

Para os tratamentos e anos em que não foi atingido o potencial, foi calculada a perda de rendimento, em relação ao potencial, e relacionada com a deficiência hídrica relativa no período em que o componente estava sendo formado.

3.5. Verificação dos modelos

Os ajustes dos coeficientes dos modelos foram avaliados pela significância de cada coeficiente e pelos coeficientes de determinação.

A verificação dos modelos foi realizada através da precisão das estimativas. Para assegurar a independência dos dados, foram utilizados 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 os graus de liberdade 1 e n-1. A estimativa de F foi obtida pela equação:

$$F_{(1, n-1)} = \frac{(\bar{Y}_{est} - \bar{Y}_{obs})^2}{S_{est}^2 + S_{obs}^2 - 2S_{correlação}} \quad [25]$$

A significância do erro devido à regressão foi determinada testando se o coeficiente angular (inclinação) da relação entre os resultados estimados e observados se diferencia 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:

$$t = \frac{b-1}{S_b} \quad [26]$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação das condições hídricas na cultura

As estimativas de deficiências hídricas (equação 19), para todos os níveis de irrigação, períodos do ciclo da cultura e anos, são apresentados na Tabela 3. Observa-se que mesmo em períodos de alta disponibilidade hídrica, como o ano agrícola de 1997/98, quando durante os 38 dias finais de instalação da área foliar ocorreu elevada precipitação pluvial e excesso hídrico (187,6 mm), existe uma parcela da demanda hídrica da cultura que é estimada como deficiência hídrica (33,1 mm).

Deficiências hídricas estimadas para ambientes com potencial matricial da água no solo mantido acima de $-0,03$ MPa pela irrigação, seguindo excessos hídricos pela ocorrência de precipitações, como a exemplificada no parágrafo anterior, podem ser causadas por aproximações do próprio modelo de balanço hídrico adotado, que não reproduzem a condição real de campo, principalmente quando utilizado em nível diário. Desta forma, deve-se ficar atento à validade de algumas dessas aproximações, tais como a fixação da profundidade máxima do sistema radicular, a adoção de limites rígidos para cálculo da capacidade de armazenamento de água do solo e a fração de água do solo que é absorvida pelas plantas e que não é afetada pelo nível de demanda evaporativa.

Tabela 3. Deficiência hídrica relativa $[1-(ET_r/ET_m)]$ em diferentes períodos da cultura do milho para diferentes anos e níveis de irrigação, estimados pelo balanço hídrico adaptado de Thornthwaite e Mather (1995). EEA/UFGRS, Eldorado do Sul, RS.

Ano	Tratamento	Período do ciclo da cultura ¹					
		Instalação	Crescimento	florescimento		Enchimento	Crescimento linear
				5 dias antes e após	10 dias antes e após		
1993/94	I4	0,24	0,15	0,22	0,33	0,29	0,37
	I3	0,24	0,17	0,26	0,36	0,31	0,39
	I2	0,24	0,20	0,34	0,43	0,31	0,43
	I1	0,24	0,24	0,43	0,49	0,30	0,45
	I0	0,29	0,40	0,66	0,64	0,32	0,53
1994/95	I4	0,34	0,22	0,13	0,12	0,18	0,17
	I3	0,35	0,22	0,15	0,13	0,19	0,18
	I2	0,34	0,25	0,18	0,14	0,22	0,21
	I1	0,35	0,28	0,18	0,14	0,23	0,21
	I0	0,34	0,40	0,34	0,25	0,25	0,29
1995/96	I4	0,34	0,24	0,38	0,26	0,27	0,21
	I0	0,34	0,55	0,32	0,27	0,30	0,26
1996/97	I4	0,33	0,2	0,20	0,25	0,14	0,15
	I0	0,33	0,41	0,60	0,55	0,26	0,47
1997/98	I4	0,19	0,16	0,04	0,06	0,27	0,19
	I2	0,19	0,16	0,04	0,06	0,27	0,19
	I0	0,19	0,16	0,04	0,06	0,28	0,21
1998/99	I5	0,41	0,19	0,25	0,21	0,17	0,16
	I2	0,41	0,31	0,35	0,33	0,37	0,35
	I0	0,41	0,36	0,38	0,39	0,45	0,44

¹ Instalação é o período da semeadura até a quarta folha completamente expandida; crescimento é o período entre a quarta folha completamente expandida e o espigamento; florescimento é o dia em que pelo menos a metade da população está em espigamento; enchimento de grãos é o período entre o florescimento e a maturação fisiológica; crescimento linear foi estimado como o período compreendido entre 35 e 70 % dos graus-dia acumulados necessários para atingir a maturação fisiológica.

4.2. Considerações sobre estimativas dos componentes do balanço hídrico

4.2.1. Profundidade do sistema radicular

Considerando que o secamento das camadas subsuperficiais do solo se deve basicamente à absorção de água pelas raízes das plantas, a profundidade do sistema radicular foi estimada pela redução do potencial matricial da água do solo. Assim, no ano de 1996/97, o sistema radicular do milho, do tratamento não irrigado já havia atingido 0,15 m de profundidade aos 20 dias após a emergência (DAE), sendo que aos 30 DAE já estava sendo retirada água entre 0,30 e 0,45 m de profundidade. Próximo aos 43 DAE o tensiômetro a 0,60 m já começava a reduzir o potencial matricial, quando houve quebra da continuidade da coluna de água e mercúrio dos tensiômetros, o que dificultou a seqüência no acompanhamento do aprofundamento do sistema radicular. Contudo, pode-se observar que, após os 62 DAE, os tensiômetros instalados a 0,90 m também apresentavam redução do potencial matricial no solo, conforme pode ser visualizado no Apêndice 5.

No ano de 1997/98 foram totalizados 693,1 mm de precipitação durante o ciclo da cultura, o que manteve o solo sempre com alta umidade e não permitiu a estimativa da profundidade do sistema radicular pelo acompanhamento das leituras tensiométricas.

No ano de 1998/99, as reduções nos potenciais matriciais dos tensiômetros instalados no tratamento I1 a 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75 e 0,90 m ocorreram aproximadamente aos 24, 34, 40, 56, 60 e 67 DAE, conforme pode ser visualizado no Apêndice 6.

Faria e Madramootoo (1996) utilizaram um modelo linear de aprofundamento do sistema radicular até o florescimento, quando a

profundidade das raízes se estabilizou. Aceitando esta aproximação, a profundidade máxima do sistema radicular do milho foi estimada em 0,75 m, uma vez que a água estava sendo retirada do solo a esta profundidade, por ocasião do florescimento, nos dois anos considerados.

As reduções do potencial matricial da água no solo após o florescimento ainda podem ser devidas ao aprofundamento do sistema radicular, sobretudo em locais onde a água estava mais disponível para absorção, já que o crescimento de raízes é dependente da turgidez das células da ponta das mesmas. Desta forma, se no perfil de solo houver água disponível apenas nas camadas mais profundas o crescimento radicular ocorrerá neste sentido e o modelo não terá precisão na estimativa da disponibilidade hídrica. Por outro lado, em longas estiagens a ascensão capilar da água pode também atuar no sentido de conduzir a umidade do solo a partir de camadas subjacentes às raízes. Assim, embora possa haver precisão na determinação da profundidade do solo, há uma margem de erro na obtenção do limite de aprofundamento das raízes, através da tensiometria.

4.2.2. Estimativa da disponibilidade de água no solo

O modelo de simulação da disponibilização da água no solo para a planta tem aproximações que são questionáveis, tais como: I) a não consideração da umidade excedente à capacidade de campo como sendo absorvida pelas plantas, pois quando esta água está descendo pelo perfil de solo pode ser interceptada pelo sistema radicular e II) a restrição de absorção na medida da necessidade de água pela cultura, em dias de alta demanda evaporativa, mesmo quando o solo está com a sua máxima capacidade de água disponível (Apêndice 7).

A existência destas duas relações determina a ocorrência de certas discrepâncias, como no dia 18 de novembro de 1996, quando foi estimado que a demanda evapotranspirativa da cultura (2,74 mm) não foi suprida, ocasionando uma deficiência relativa de 5%, embora houvesse um excesso hídrico de 67,95 mm na véspera. Apesar do valor ser pequeno ele ilustra uma discrepância do método e que tende a ser maior dois a três dias após altas precipitações.

Por outro lado, como é esperado em todos modelos, a estimativa de deficiência hídrica pelo balanço hídrico apresenta uma série de imprecisões, que parecem causar estimativas absurdas, é possível haver compensações por outras aproximações. A superestimativa da deficiência exemplificada anteriormente pode ser compensada por algumas subestimativas da mesma em dias de alta demanda evaporativa, podendo o fluxo não ser sustentado pelo sistema radicular, mesmo que o solo tenha elevada disponibilidade hídrica.

4.2.3. Estimativa da evapotranspiração real

Aceitando a transpiração calculada a partir do fluxo de seiva no colmo, que é estimado pela velocidade de propagação de um pulso de calor, como padrão, pois este método foi aferido com o lisímetro por Santos (1998). A comparação da demanda hídrica da cultura (ET_m) e de sua parcela efetivada pela transpiração serve para avaliar a precisão das estimativas de ET_r e, portanto, das aproximações adotadas no método do balanço hídrico.

Durante o período em que os sensores de pulso de calor estiveram instalados, monitorando o fluxo de seiva, a área foliar da cultura cobria totalmente o solo, sendo que o índice de área foliar regrediu de 5,10 para 4,41 em I5 e de 4,34 para 3,64 no tratamento I1. Esta cobertura de folhas reduz a

parcela que a evaporação de água do solo representa na perda total de evapotranspiração. Esta expectativa de baixa evaporação na superfície do solo se confirmou no tratamento I5, onde o solo apresentava alta disponibilidade hídrica, como pode ser observado na Figura 3. Obteve-se uma relação linear entre a transpiração determinada por fluxo de seiva e a evapotranspiração real estimada pelo balanço hídrico, para os dias em que o consumo hídrico relativo (ETr/ETm) foi maior do que 80%. Pela análise estatística destes dados a evapotranspiração real poderia ser estimada unicamente pelo fluxo de água através do colmo e transpirada pelas folhas. Entretanto, sabe-se que a parcela da evaporação do solo é pequena em relação à evapotranspiração total. Desta forma, estima-se que, nas condições do período em que os sensores de pulsos de calor estavam instalados, 3,3% da evapotranspiração da cultura ocorreu por evaporação na superfície do solo (Figura 3).

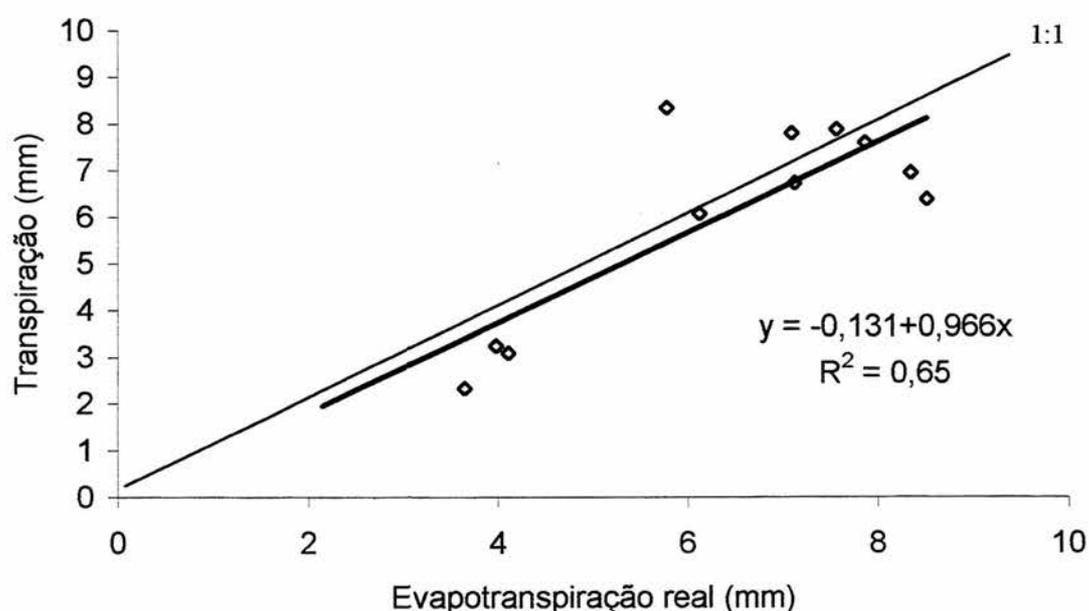


Figura 3. Relação entre a evapotranspiração real, estimada pelo balanço hídrico, e a transpiração, estimada por fluxo de seiva no colmo, ao nível diário, para o tratamento de maior nível de irrigação, tendo o milho IAF superior a 4, no ano agrícola de 1998/99. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

Já em condições em que o consumo hídrico relativo foi menor do que 80%, as estimativas de evapotranspiração passaram a ser menores do que a transpiração das plantas, evidenciando que o solo tem uma capacidade de disponibilizar água maior daquela estimada pelo método do balanço hídrico utilizado, para níveis de demanda atmosférica entre 2,5 e 6,0 mm e com um balanço pluviométrico (P-ETm) acumulado de 30 a 70% em relação à capacidade de armazenamento de água disponível na camada de solo explorada pelas raízes.

Para o menor nível de irrigação (I1) as estimativas de evapotranspiração real foram inferiores aos totais das estimativas de transpiração determinados por fluxo de seiva (Figura 4). Estas diferenças podem ser atribuídas ao método de estimativa da disponibilidade de água do solo, já que este não teria mais água disponível nas camadas que supostamente estariam sendo exploradas pelo sistema radicular. Esta afirmativa é sustentada pelo valor do balanço pluviométrico (P-ETm) acumulado que, durante o período em que foi acompanhada a transpiração, variou de 57 a 202% da capacidade de armazenamento de água até 75 cm de profundidade do solo.

Neste período, excluindo os dias em que o sistema de pulso de calor não esteve operando, a transpiração calculada foi de 99% da estimativa da evapotranspiração máxima da cultura. Portanto, mesmo não tendo disponibilidade hídrica na camada supostamente explorada pela cultura, as plantas não tiveram restrição de água. Esta informação indica que, no ano de 1998/99, a profundidade de extração de água do solo foi maior do que a estimada pelo modelo utilizado, para o tratamento com a menor lâmina de irrigação.

O presente trabalho não avaliou a influência da deficiência hídrica sobre a profundidade do sistema radicular, não permitindo isolar o seu efeito sobre os erros de estimativa. Contudo, deve-se salientar que os resultados analisados anteriormente são do ano em que ocorreu uma deficiência hídrica longa, durante o crescimento da cultura e o enchimento dos grãos. Portanto, é possível que, durante todo este período, a cultura aprofundou mais o sistema radicular.

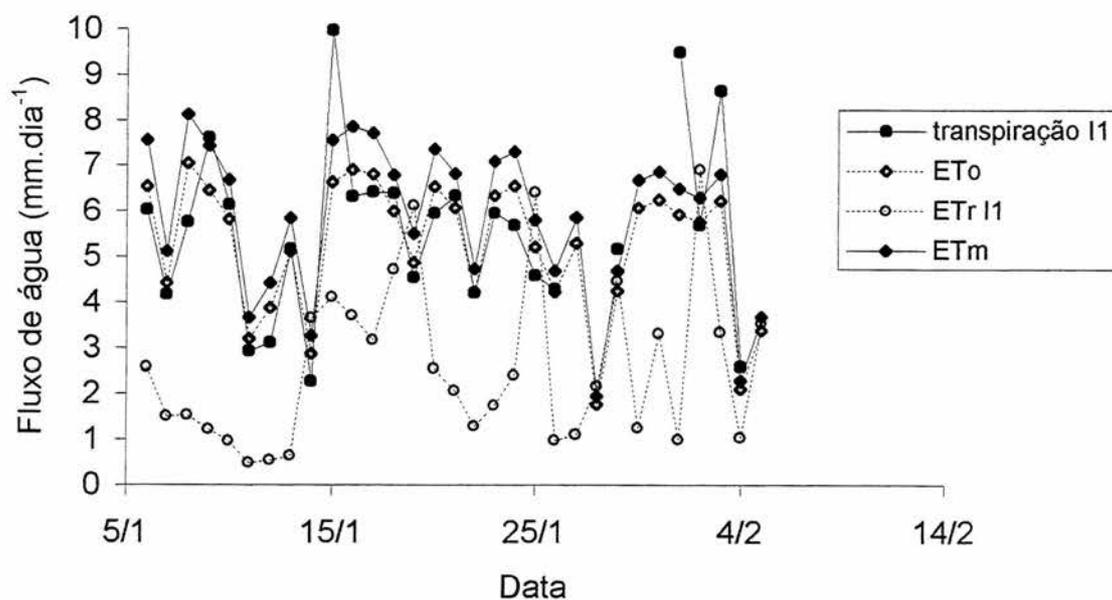


Figura 4. Estimativas da evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração máxima da cultura (ETm), evapotranspiração real (ETr) e transpiração calculada pelo fluxo de seiva no tratamento I1, em milho com IAF superior a 4, no ano agrícola de 1998/99. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

4.3. Ajuste do modelo de estimativa do índice de área foliar

Na tabela 4 são apresentados valores de graus-dia acumulados que separam os períodos em que são estabelecidos os componentes do rendimento: a) número de plantas por unidade de área (período de instalação

(maturação fisiológica). Possivelmente, devido a uma deficiência hídrica no início do ciclo da cultura, houve um aumento no período de crescimento em 1998/1999, não sendo este ano agrícola incluído nas estimativas das médias de graus-dia necessários para atingir as diferentes etapas de estabelecimento dos componentes do rendimento. As médias de graus-dia foram arredondadas para dezenas devido à variação diária de graus-dia ser de aproximadamente 14, não tendo a média resolução para unidade. Desta forma, foi de 320 a média de graus-dia necessários para a cultura apresentar a quarta folha totalmente expandida, considerada como critério para a completa instalação da população de plantas, de 900 graus-dia para atingir a antese e de 1740 graus-dia para a maturação fisiológica.

Os valores necessários para a instalação da cultura e a antese estão coerentes com a evolução do índice de área foliar (Apêndices 8), pois o final da instalação da cultura coincidiu com o início do período de rápido acréscimo da área foliar e a antese com a ocorrência da máxima área foliar. Contudo, a observação no campo da ocorrência da maturação fisiológica, que é um estágio de difícil identificação, ficou antecipada pois ainda existia área verde durante este período, além de ainda ocorrer aumento da matéria seca total (Apêndice 9) e matéria seca de grãos (Apêndice 10). Isto demonstra que as plantas ainda estavam fotossintetizando e translocando fotoassimilados aos grãos, não tendo atingido a verdadeira maturação fisiológica, quando foi feita a verificação visual de formação da camada preta na base dos grãos.

Segundo Flesch e Dale (1987), o início da rápida senescência das folhas do milho inicia quando são acumuladas 90% das necessidades térmicas para atingir a maturação fisiológica. Com base nesta afirmação, aceita-se que a necessidade de graus-dia para atingir a maturação fisiológica tenha sido de 2000 e 1890, para os híbridos Pioneer 3230 e Pioneer 3063, respectivamente,

valores obtidos pela divisão do número de graus-dia acumulados até o início da rápida senescência por 0,9.

Tabela 4. Datas observadas e graus-dia acumulados para estádios que separam os períodos de formação dos componentes do rendimento do milho (Pioneer 3230 e Pioneer 3063). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 1993/94 a 1998/99.

Anos ¹	Datas			Graus-dia acumulados		
	Instalação	Antese	Matur. fisiol.	Instalação	Antese	Matur. fisiol.
1993/94	26/11	08/01	24/02	321	923	1664
1994/95	03/12	08/01	21/02	316	927	1540
1995/96	22/11	29/12	06/03	318	884	1912
1996/97	27/11	04/01	26/02	322	914	1808
1997/98	23/11	31/12	26/02	317	881	1780
1998/99	22/11	31/12	25/02	337	946	1772
Média aproximada				320	900	1740
CV (%)				2,42	2,79	7,32

¹ Híbrido Pioneer 3230 de 1993/94 a 1996/97 e Pioneer 3063 de 1997/98 a 1998/99.

Para obter precisão no ponto de segmentação da equação, o acúmulo médio de graus-dia necessários para o início do florescimento da cultura, este foi estimado utilizando os seis anos de experimentação. Desta forma, foi estabelecido que o IAF máximo ocorreu quando foram acumulados 900°dia. Este foi o ponto do modelo, que separou o primeiro segmento, que

corresponde ao período linear de implantação do índice de área foliar, e o segundo segmento, de lenta senescência (Figura 5).

O modelo linear segmentado, proposto por Brisson et al. (1990), adequou-se aos resultados de IAF em relação aos graus-dia. O mesmo tem precisão nas estimativas e não necessita de instrumental sofisticado para obter a única variável de entrada, que é a temperatura média diária após a emergência, que pode ser obtida em qualquer estação meteorológica ou a partir de um simples conjunto de termômetros de máxima e mínima.

O modelo possui uma estrutura matemática simples e adequada para descrever a evolução do IAF de uma população de plantas de milho, durante as etapas em que a área foliar possui uma maior importância para a cultura. Por sua vez, também se constitui numa importante variável de entrada em outros modelos de simulação de culturas.

Pequenas superestimativas no índice de área foliar máximo podem advir do fato do modelo não considerar a gradual redução da velocidade de aumento do índice de área foliar quando se aproxima do florescimento, principalmente quando não são coletados dados próximo do florescimento. A estimativa do IAF máximo pelo modelo é de 6,12, estando um pouco acima dos valores máximos observados no experimento (Figura 5), de 5,8 estimado para modelos sigmoidal por Flesch e Dale (1987) e de 5,1 observado por Maddonni e Otegui (1996), mas que não invalida o modelo.

O ajuste com dados dos anos agrícolas de 1993/94 e 1995/96 foi satisfatório e significativo a um nível menor do que 0,0001, sendo que 96,58 % das variações de IAF são explicadas pela equação segmentada dos graus-dia.

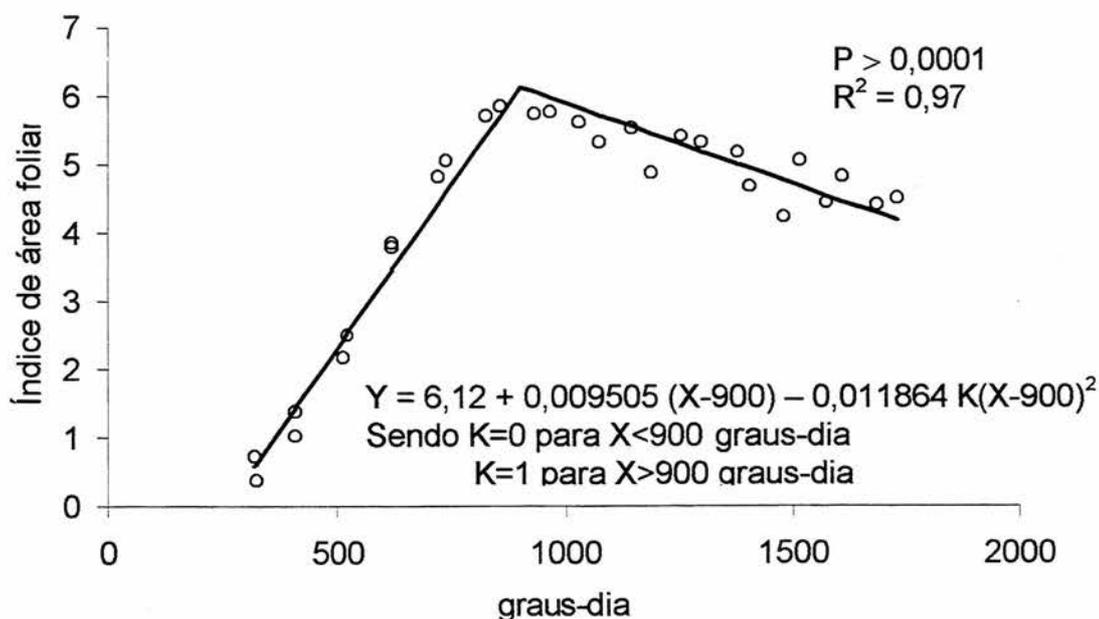


Figura 5. Modelo de estimativa do índice de área foliar (IAF) de milho (Pioneer 3230) a partir de graus dia acumulados após a emergência, ajustado a partir dos resultados experimentais dos anos agrícolas de 1993/94 e 1995/96. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

A decomposição dos resíduos não detectou imprecisões das estimativas dos conjuntos de dados apresentados, tanto nos testes do erro devido à predição quanto nos erros devido à regressão. Contudo, quando foram testados os coeficientes de interceptação da equação na ordenada, comprova-se uma superestimativa dos valores do último ano de coleta de dados (Tabela 5). Este resultado deve-se ao efeito de uma deficiência hídrica ocorrida durante o início do mês de novembro, quando o sistema de irrigação ainda não havia sido instalado e uma população de plantas daninhas competia por água. Essa deficiência causou um aumento de aproximadamente 70 graus-dia no período de instalação da cultura, que se refletiu nos graus-dia necessários para atingir o florescimento, de maneira semelhante aos efeitos de deficiência hídrica nos tratamentos sem irrigação, observados por França (1997).

Quando o efeito da deficiência hídrica no alongamento do ciclo da cultura foi retirado, mediante a diminuição de 70 graus-dia, a verificação da precisão ainda acusou uma superestimativa do IAF pelo modelo, indicando que o efeito da deficiência hídrica, apesar de ocorrido no período de instalação da cultura, diminuiu a expansão foliar não apenas neste período, mas durante todo o crescimento.

Tabela 5. Indicadores da precisão das estimativas do índice de área foliar (IAF) do milho, em função de graus-dia acumulados, pelo modelo linear segmentado. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

Indicadores	Pioneer 3230 1	Pioneer 3063 sem déficit hídrico ²	Pioneer 3063 com déficit hídrico ³	Retirando efeito do déficit hídrico ³
Erro de precisão	0,00292 ns	0,04125 ns	0,28259 ns	0,20093 ns
Erro da regressão	0,00299 ns	0,00514 ns	0,01591 ns	0,03014 ns
Erro aleatório	0,08878	0,10414	0,19329	0,11342
Erro total	0,09469	0,15370	0,51534	0,36277
Valor mínimo de a	-0,0955	-0,1548	0,3058	0,2514
Valor máximo de a	0,2036	0,1579	0,4574	0,6451

¹ Ano de 1996/97

² Ano de 1997/98

³ Ano de 1998/99.

O efeito da deficiência hídrica sobre o IAF máximo não era esperado, uma vez que a influência do déficit hídrico sobre o alongamento das folhas pode ser compensada por uma maior velocidade de alongamento, quando é eliminada a deficiência (Acevedo et al., 1971; Van Volkenburgh e Boyer, 1985). Hsiao et al. (1970) demonstraram que, se uma folha ainda estiver em processo de alongamento, uma deficiência hídrica não afeta o potencial de alongamento das folhas subseqüentes a esta.

Os resultados da validação do modelo (Tabela 5) demonstram que este é válido para o híbrido com o qual foram ajustados os coeficientes, para um híbrido que tenha as mesmas características de precocidade e potencial genético (precoce e híbrido triplo), mas não é válido quando algum estresse interfere na expansão foliar ou na duração do ciclo.

A deficiência hídrica reduziu a velocidade de formação do IAF em $0,00105 \text{ cm}^2 \cdot \text{grau-dia}^{-1}$ para cada décimo de aumento da deficiência relativa, (Apêndice 11). Também provocou uma redução no índice de área foliar máximo em 0,53 para cada décimo de aumento da deficiência relativa, durante o período de crescimento da cultura (Figura 6).

↙ A ocorrência de deficiência hídrica reduz a expansão celular e, em casos mais rigorosos, a divisão celular (Timoty et al., 1995a). Deficiências ocorridas durante o período de instalação da área foliar tendem a reduzir o tamanho final da folha e, por conseguinte, o índice de área foliar máximo da população de plantas.

A deficiência tem um efeito menor sobre o índice de área foliar máximo quando ocorre no período de expansão de folhas que senescem antes do florescimento, pois estas não participam diretamente da área foliar máxima da cultura, reduzindo apenas o potencial de assimilação durante o período de instalação da área foliar. Portanto, deficiências hídricas no período de rápido crescimento da cultura é que mais interferem no potencial de área foliar de uma população de plantas. A não consideração da etapa de crescimento em que a planta se encontra pode causar superestimativas do efeito de deficiências ocorridas no início do crescimento, uma vez que os dados utilizados neste modelo tiveram deficiências mais próximas ao florescimento.

Salienta-se que o valor do intercepto de 6,78 de índice de área foliar, quando a deficiência relativa é nula, não está dentro do intervalo de

deficiência hídrica relativa utilizados para montagem do modelo. Logo, não é possível considerá-lo como uma estimativa válida, sendo que, pelas informações constantes na revisão bibliográfica, baixas deficiências hídricas ao nível diário, provavelmente não provocam redução do índice de área foliar.

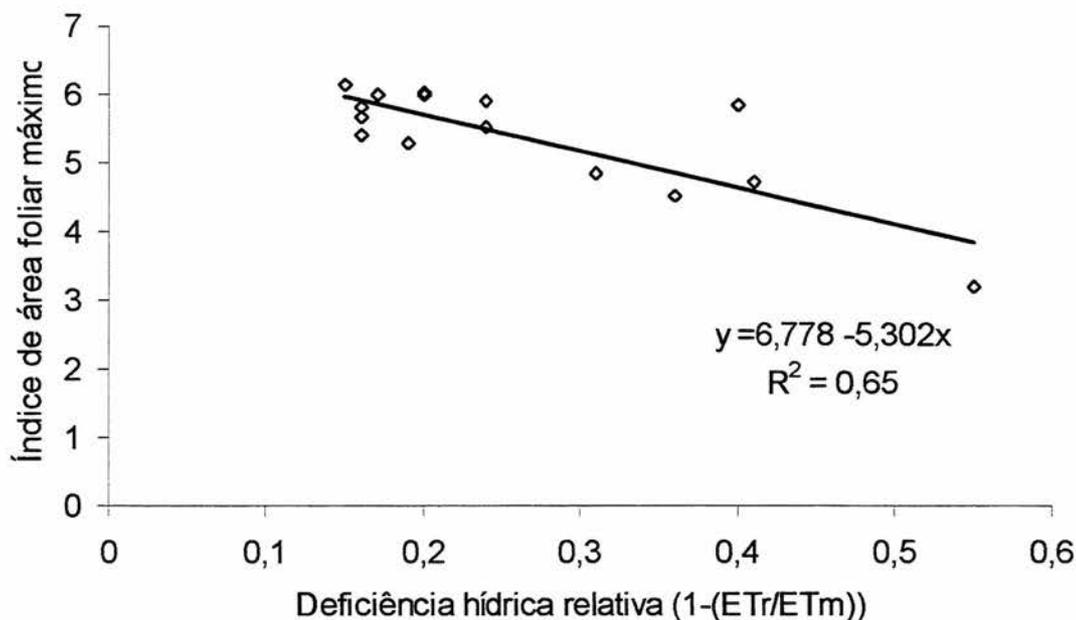


Figura 6. Índice de área foliar máximo em função da deficiência hídrica relativa no período de instalação da área foliar da cultura do milho (Pioneer 3230 e Pioneer 3063), no período de 1993 a 1999, EEA/UFGRS, Eldorado do Sul, RS.

4.4. Ajuste do modelo energético

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 adaptada da lei de Beer, foi de 0,68 (Figura 7). Este valor está próximo a 0,7, encontrado por Gosse et al. (1986). Em relação aos coeficientes de extinção estimados a partir da eficiência de absorção, o valor estimado de 0,68 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 Monteith (1969) e por Gallo e Daughtry (1986), de 0,65 e 0,66, respectivamente.

Os fatores que causam redução do coeficiente de extinção são: a menor eficiência de interceptação em genótipos com 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 ajustada ao híbrido e condições do meio; o menor ângulo zenital da radiação solar, na região durante o verão, o que diminui a eficiência de interceptação, pois permite que uma maior parcela da radiação incidente seja transmitida por entre as folhas do dossel.

A alta significância estatística da regressão linear que estimou o coeficiente de extinção assegura que parcela significativa das variações de eficiência de interceptação é explicada pela relação linear existente com o IAF. A confiabilidade no coeficiente estimado advém do reduzido valor de seu erro padrão de estimativa (0,0054), bem menor do que a última unidade apresentada para o coeficiente de extinção (Figura 7).

Por outro lado, o coeficiente de extinção foi estimado apenas para IAF acima de 2,7 e no período em que o ângulo de incidência da radiação solar mais se aproxima do zenite, o que remete à necessidade de uma validação deste coeficiente de extinção para todo o ciclo da cultura e em épocas de semeadura extremas, como agosto e fevereiro, para verificar a estabilidade do valor estimado e validar o modelo.

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 em deficiência hídrica, diminuindo desta forma a

área foliar exposta à radiação solar e aumentando a radiação transmitida pelo dossel da cultura.

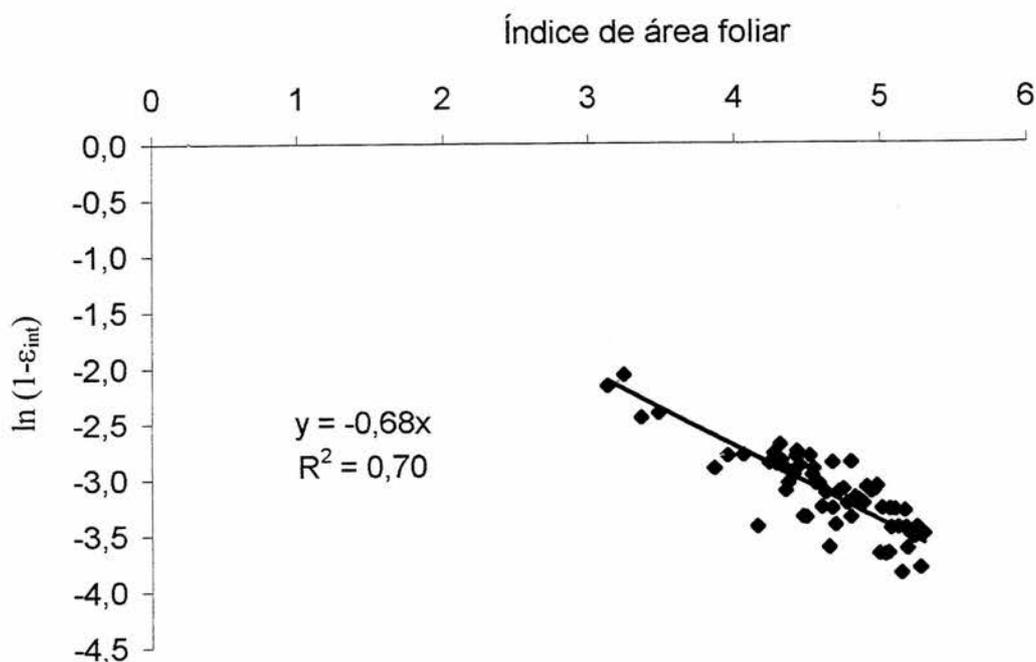


Figura 7. Relação entre $\ln(1-\epsilon_{int})$ e o índice de área foliar (IAF) em milho (Pioneer 3063) irrigado, sendo o coeficiente de extinção igual ao módulo do coeficiente de regressão. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 1998/99.

No tratamento irrigado e com índices de área foliar maiores do que 2,7 a eficiência de interceptação da RFA apresentou incrementos decrescentes com o crescimento da área foliar, chegando próximo de sua eficiência máxima (0,98) nos maiores IAF observados (Figura 8). Esta relação se ajusta 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) e Russel et al. (1989).

Os dados utilizados para ajuste do modelo energético, nas condições ambientais e de cultivo da Depressão Central do Rio Grande do Sul, obtidos no experimento conduzido no verão de 1998/99, não tendo uma posterior

repetição do experimento a verificação dos coeficientes não foi possível, pela ausência de dados independentes. Desta forma o ajuste dos dados será discutido apenas em relação à precisão da estimativa dos coeficientes e de sua comparação com resultados obtidos por outros autores.

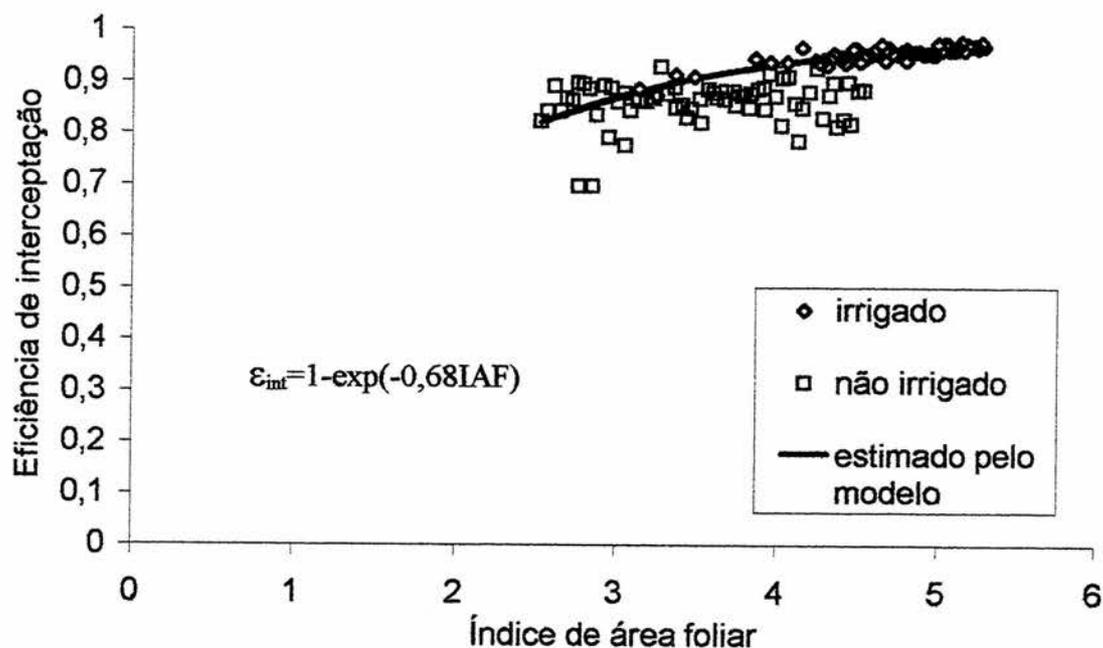


Figura 8. Eficiência de interceptação observada em milho (Pioneer 3063), irrigado e não irrigado e estimada em função do índice de área foliar. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 1998/99.

A dispersão dos valores de eficiência de interceptação da RFA, calculados para o tratamento não irrigado, em relação aos valores estimados pelo modelo ocorrer praticamente durante todo o período (Figura 8), e não concentrada em períodos de menor disponibilidade hídrica. Contudo, além de ser provocada pela gradual redução da disponibilidade de água no solo, e conseqüentemente de 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. Desta 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, explicando a diminuição da eficiência de interceptação RFA 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, porém tendo variações entre os valores obtidos por diferentes autores (Figura 9). Neste experimento, a parcela de RFA interceptada que não foi absorvida pelo dossel da cultura de milho foi de 7,6 %. Este coeficiente está dentro da faixa estimada por Varlet-Grancher et al. (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 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) (Figura 9), sendo que estes não diferem entre si a um nível de 1 % de significância.

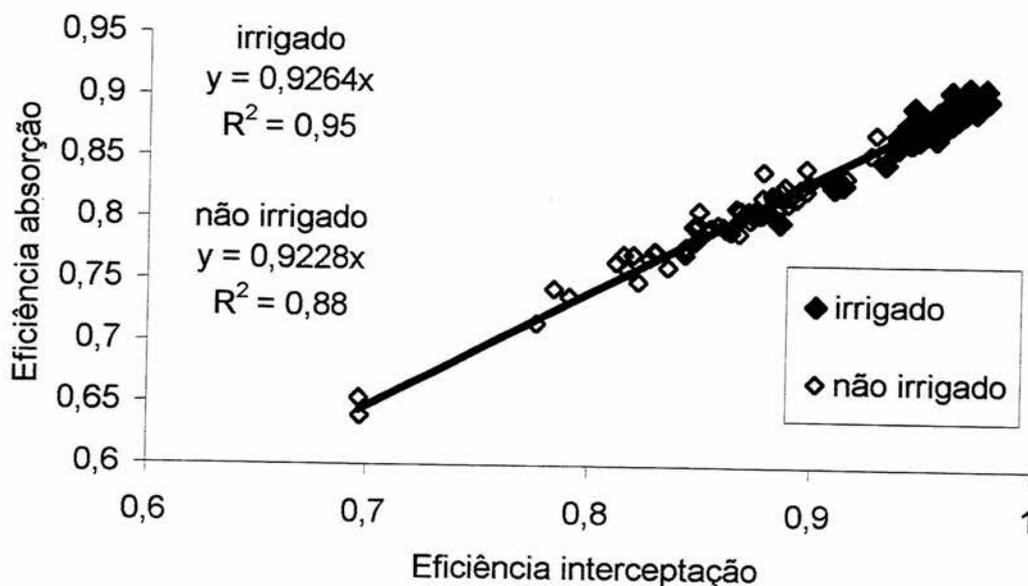


Figura 9. Relação entre a eficiência de absorção e a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa no milho (Pioneer 3063), irrigado e não irrigado. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 1998/99.

Esta relação constante entre a eficiência de interceptação (γ_{int}) e de absorção (γ_{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:

$$\gamma_{abs} = 0,925 \cdot \gamma_{int} \quad [27]$$

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

$$\gamma_{uso} RFA_{abs} = \gamma_{uso} RFA_{int} / 0,925 \quad [28]$$

Por não haver necessidade de avaliar as eficiências para as parcelas absorvida e interceptada, pois estas mantêm uma proporcionalidade,

neste trabalho serão apenas analisadas as eficiências de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e sua eficiência de uso pelo milho, podendo estas ser convertidas para a parcela absorvida, se houver interesse mediante a utilização das equações 27 e 28.

Na Figura 10, observa-se que o milho apresentou eficiência de uso média da RFA interceptada durante o ciclo de 3,27 g de matéria seca aérea por MJ de RFA interceptada, valor este que fica dentro da faixa de valores encontrados por outros autores (Tabela ^{2??} 1). Contudo, superestima os valores reais durante o período de implantação da cultura e final do enchimento de grãos e subestima durante a etapa de máxima eficiência de uso da RFA interceptada. Para obter uma melhor estimativa do acúmulo de matéria seca aérea, durante todo o ciclo da cultura, *estes três períodos tiveram suas estimativas de eficiência de uso da RFA interceptada estimadas de maneira independente.

Durante o período de instalação da cultura e início do rápido acréscimo da área foliar a matéria seca aérea acumulada por unidade de RFA interceptada aumentou até atingir a máxima eficiência de uso da RFA interceptada (Figura 11).

O acúmulo de matéria seca aérea por unidade de RFA interceptada ajustou-se a um modelo polinomial de segundo grau. Logo, o aumento da eficiência de uso da RFA interceptada pode ser estimado pela derivada da equação ajustada (Figura 11), igual a:

$$\mathcal{E}_{uso} = 0,51 + 0,0182RFA_{int} \quad [29]$$

sendo RFA_{int} a radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada e \mathcal{E}_{uso} a eficiência de utilização da RFA interceptada.

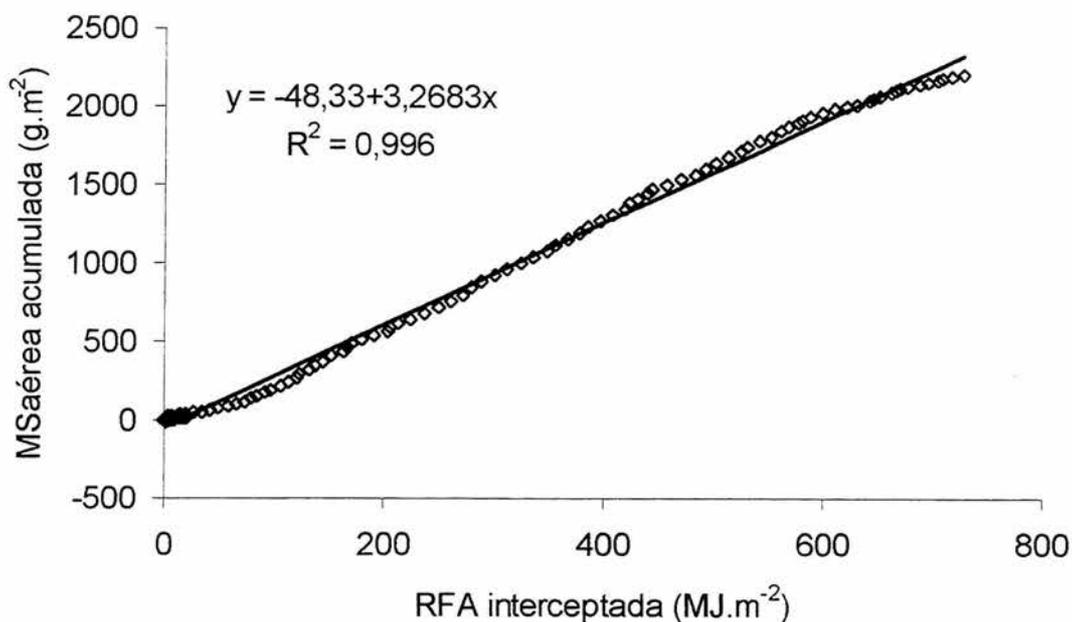


Figura 10. Relação entre a massa de matéria seca (MS) aérea acumulada pelo milho, (Pioneer 3063), e a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 1998/99.

O parâmetro de interceptação da equação, que estima a eficiência de uso da RFA interceptada quando as plantas de milho estão emergindo, é de 0,51 g de matéria seca aérea para cada MJ de RFA interceptada. O coeficiente angular estima que o acréscimo na eficiência de uso da RFA interceptada é linear e de 0,0182 g de matéria seca aérea por MJ de RFA interceptada (correspondendo a um aumento da eficiência de uso no tempo de 0,004325 g massa de matéria seca aérea por MJ de RFA interceptada para cada grau-dia acumulado), até atingir a etapa linear de acúmulo de matéria seca aérea quando a eficiência de uso da radiação é máxima (Figura 11).

Varlet-Grancher¹ citado por Ruget et al. (1990), também encontrou um aumento linear da eficiência de uso da radiação solar no início do ciclo da cultura do milho, mas durante um período que se estendeu até o final do crescimento da cultura e iniciou-se na emergência com 2 g.MJ⁻¹.

¹ Varlet-Grancher, C. Analyse du rendement de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. Paris, 1982, 144 p. Tese de doutorado. Université Paris-Sud.

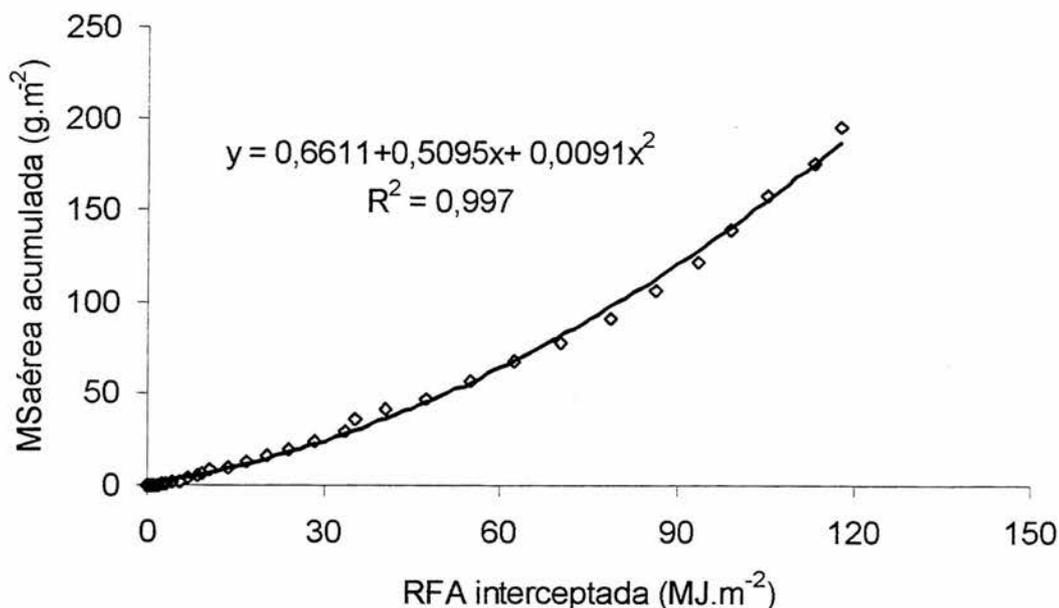


Figura 11. Relação entre a matéria seca aérea (MS) acumulada e a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada pelo milho (Pioneer 3230), durante o período de aumento da eficiência de uso da RFA interceptada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, no ano agrícola de 1998/99.

A baixa eficiência de utilização da RFA_{int} no início do ciclo pode ser explicada pelo maior deslocamento de matéria seca para o crescimento radicular e à menor temperatura do ar. Contudo, as reduções observadas no experimento em Eldorado do Sul podem estar associadas à ocorrência de deficiência hídrica no início do mês de novembro, quando o sistema de irrigação ainda não havia sido instalado e uma população de plantas daninhas competia por água.

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 12.

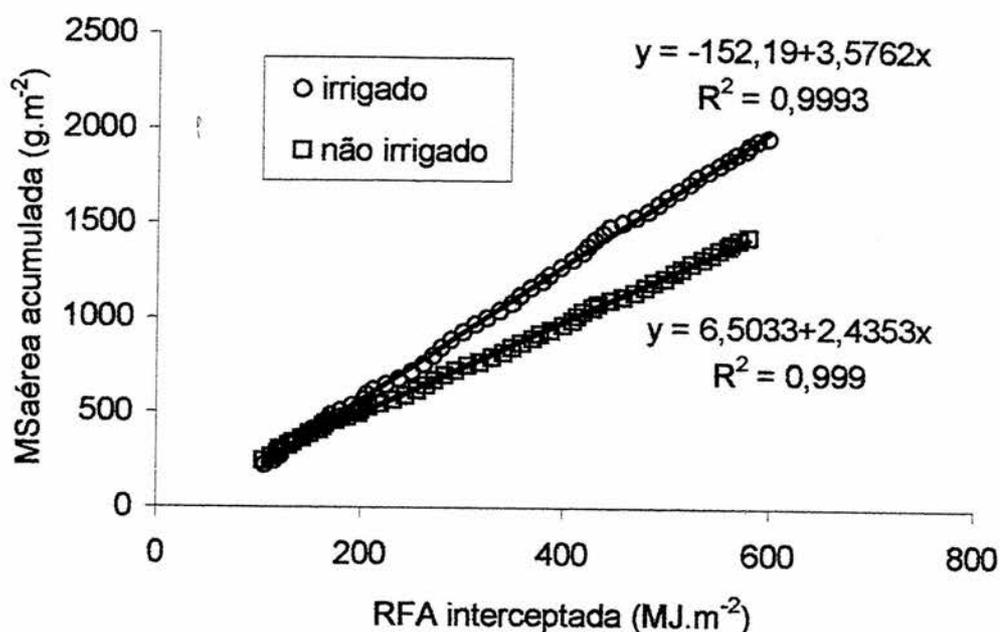


Figura 12. Relação entre a massa de matéria seca aérea (MS) acumulada e a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada em milho (Pioneer 3063), irrigado e não irrigado. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 1998/99.

A relação se mostrou consistente, com um erro padrão de estimativa do coeficiente de inclinação de $0,0128 \text{ g.MJ}^{-1}$, o que dá segurança quanto à precisão do modelo, pois este valor representa 0,358% do valor estimado.

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. Esta observação já havia sido feita por Russel et al. (1989) segundo os quais os modelos energéticos são pouco confiáveis em períodos curtos.

Admitindo que a eficiência de utilização da RFA interceptada durante o período de crescimento linear da cultura é máximo e igual a 3,58, e que o acréscimo da eficiência de uso ocorre linearmente, conforme a equação 29, estima-se que a máxima eficiência de utilização da RFA interceptada ocorreu quando foram acumulados $168,7 \text{ MJ.m}^{-2}$ de RFA interceptada o que,

neste experimento, correspondeu a 710 graus-dia (por volta da nona ou décima folha expandida).

A gradativa redução da eficiência de uso da RFA interceptada ao final do ciclo ocorre devido à redução do aparato fotossintético das folhas, sendo que esta pode ser estimada a partir da derivada da equação polinomial de segundo grau, que foi ajustada à relação da MS aérea acumulada com a RFA interceptada acumulada, ambas por unidade de área (Figura 13). O resultado desta derivada é:

$$\mathcal{E}_{uso} = 15,13 - 0,0194RFA_{int} \quad [30]$$

sendo RFA_{int} a radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada e \mathcal{E}_{uso} a eficiência de utilização da RFA interceptada.

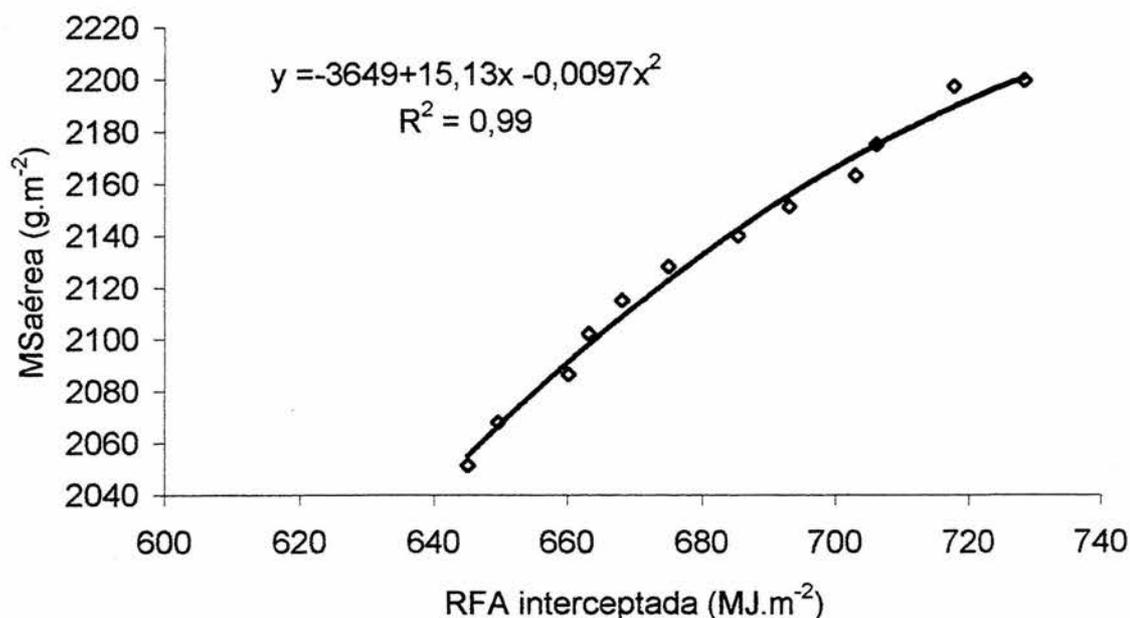


Figura 13. Relação entre a massa de matéria seca (MS) aérea acumulada e a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada em milho, (Pioneer 3063), após a etapa de máxima eficiência de uso da RFA. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 1998/99.

Diferentemente da derivada do período de instalação da cultura, a derivada do final do ciclo apresenta um coeficiente angular negativo, ou seja, a eficiência de uso da RFA interceptada reduz em 0,0194 grama o acúmulo de MS aérea por MJ de RFA interceptada para cada MJ de RFA interceptada.

Utilizando para Y o valor da eficiência de uso máxima da RFA interceptada, na equação 30, é estimado que o início da redução da eficiência de utilização da RFA interceptada ocorre quando são acumulados 595 MJ de RFA interceptada, o que correspondem a 1393 graus-dia. Já utilizando o valor zero para Y estima-se que a eficiência de utilização tornou-se nula quando são acumulados 779,8 MJ de RFA interceptada, que correspondem a 1782 graus-dia.

Neste período as plantas já estão em processo de rápida senescência das folhas, e a diminuição da eficiência de uso da RFA_{int} ocorre principalmente porque as folhas senescentes continuam interceptando RFA. Porém, estas não mais produzem fotoassimilados, por não terem mais o aparato fotossintético, cuja destruição possibilita a translocação do nitrogênio das folhas para os grãos.

O modelo energético, ajustado 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 três anos em que o modelo foi aplicado e os dois híbridos utilizados, conforme apresentado na Tabela 6. Portanto, o modelo é válido para a estimativa da matéria seca acumulada em condições ambientais sem limitações ao crescimento e desenvolvimento destes híbridos de milho e, possivelmente, para híbridos com características semelhantes.

Tabela 6. Indicadores da precisão nas estimativas da matéria seca aérea do milho irrigado pelo modelo energético. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

	Pioneer	Pioneer	Pioneer	Pioneer	Pioneer
Indicadores	3230	3230	3230	3230	3063
	1993/94	1994/95	1995/96	1996/97	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	12779,00	9018,62	4669,94
Erro total	26950,32	9275,06	148191,00	12453,60	15434,80

A partir da verificação dos coeficientes estabelecidos, admitindo que a eficiência de interceptação da radiação é dependente somente do índice de área foliar da cultura, foram estimadas as eficiências de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela população de plantas com níveis de irrigação abaixo da capacidade de campo.

A eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada estimada para o período de máxima eficiência de uso da radiação tem uma relação linear, significativa ao nível de 5%, com a deficiência hídrica estimada pelo balanço hídrico (Figura 14). Para condições de restrições hídricas, 77% das variações da eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa foram explicadas pela relação linear obtida com o consumo hídrico relativo estimado.

Apesar do alto coeficiente de determinação, a equação não pode ser utilizada como preditora da eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura em seu período de acúmulo linear da matéria seca aérea, pois não foi aferida com dados independentes.

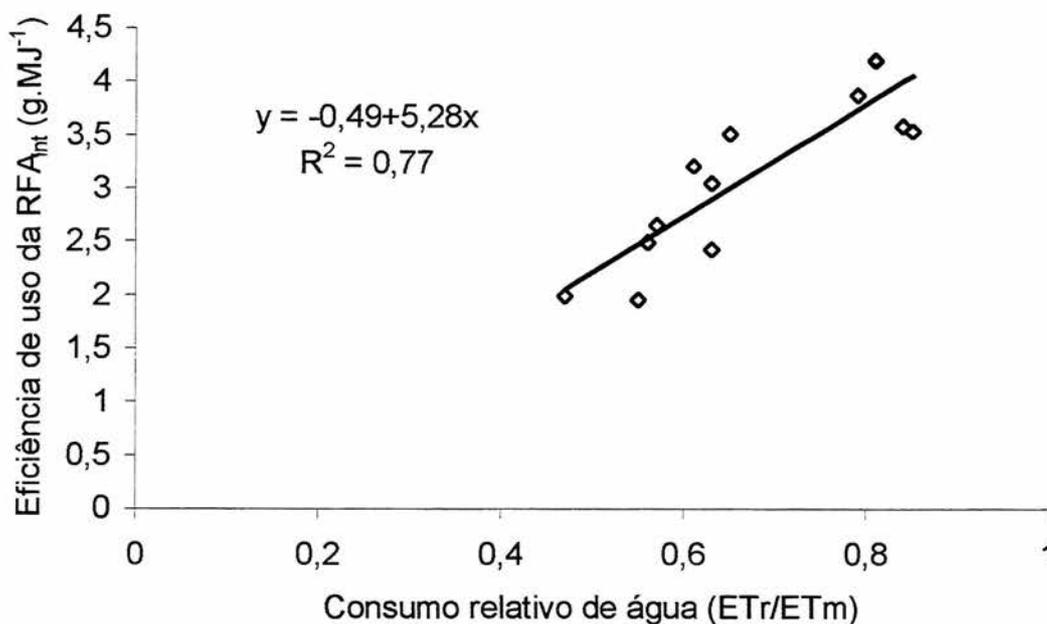


Figura 14. Relação entre a eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{int}) e o consumo hídrico relativo em milho, obtida em experimentos entre 1993 e 1999. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

A alta relação existente entre as variáveis da equação contribui para a aceitação do método do balanço hídrico como estimador de deficiência hídrica. Apesar dos erros de estimativa em períodos específicos, principalmente por não ser considerado o efeito da deficiência hídrica sobre o aprofundamento do sistema radicular, além de superestimar a deficiência hídrica quando o solo está com alta umidade, houve uma relação linear com a eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa, que é biologicamente consistente.

Esta adequabilidade do modelo para estimativa da matéria seca permite estimar também o rendimento da cultura, desde que seja conhecida a distribuição desta matéria seca entre as partes que compõem a planta, considerados os fatores que interferem neste processo. O rendimento de grãos pode ser estimado pela multiplicação da estimativa de matéria seca aérea

acumulada no ciclo da cultura com o índice de colheita. O índice de colheita é a razão entre o rendimento de grãos da cultura e o rendimento biológico, comumente representado pela matéria seca aérea acumulada.

Um dos fatores que interferem na distribuição da matéria seca aérea nas diferentes partes do vegetal, e portanto no índice de colheita, é a ocorrência de deficiência hídrica. Esta alteração do índice de colheita depende do genótipo do híbrido e do nível de deficiência a que este foi submetido. Devido a isto, Stockle e Campbell (1985) propuseram que fossem estabelecidas regressões entre o índice de colheita e o índice de estresse hídrico acumulado durante o ciclo da cultura.

Os resultados não alcançaram concordância com esta afirmativa pois a regressão linear entre o índice de colheita e a deficiência hídrica relativa estimada não foi significativa. Como pode ser observado na Figura 15, menos de 0,5% das variações do índice de colheita seriam explicadas pelas variações da deficiência hídrica estimada.

A distribuição da matéria seca é influenciada pela relação fonte-dreno estabelecida durante cada etapa do ciclo da cultura, pois surgem novas partes da planta (dreno) que são privilegiadas na distribuição dos fotoassimilados (fonte) e tendo estas partes diferentes potencias de realocação da matéria seca para os grãos, por ocasião da etapa final de enchimento de grãos. Por isto, o índice de colheita é condicionado não somente pelo nível da deficiência hídrica, mas também pelo estágio de desenvolvimento da cultura, quando da ocorrência do déficit hídrico.

As relações entre o índice de colheita e as deficiências hídricas relativas, ocorridas em cada estágio de desenvolvimento da cultura, não foram significativas. Modelos de regressão múltiplos foram testados, tendo como resultado:

$$IC = 0,36 + 0,914X_1 - 0,621X_2 \quad [30]$$

sendo IC o índice de colheita, X_1 a deficiência hídrica no período de enchimento de grãos e X_2 a deficiência no período de crescimento.

Apesar da significância desta regressão, apenas 45% das variações do índice de colheita são explicadas pelas deficiências hídricas estimadas que compõem a equação. Como a variação de índice de colheita é alta, o erro padrão de sua estimativa, que contém os demais 55% de variações, também é elevado, atingindo 18% da média do índice de colheita.

A exclusão deste modelo da variável deficiência hídrica no florescimento, período em que a cultura apresenta maior sensibilidade a esta variável, é parcialmente explicada pela alta correlação entre a deficiência hídrica no crescimento e no florescimento ($r=0,64$). Contudo, esta correlação é devida à utilização de dados que possuem uma elevada variação nos níveis de deficiência hídrica entre anos e tratamentos, mas com baixa variação nas épocas de ocorrência das deficiências, pois esta variou apenas entre os anos, proporcionando falsas correlações.

O entendimento de que o índice de colheita é formado pela relação fonte-dreno durante todo o ciclo da cultura e que existe uma relação direta entre o resultado desta relação, em determinado período, com o nível de dreno que existe no período posterior, demonstra que o efeito das condições ambientais em um período, sobre o índice de colheita, será estendido aos períodos posteriores. Desta forma, o modelo linear múltiplo, que soma os efeitos das deficiências nos diferentes períodos, não é o mais adequado.

Uma maneira de evitar estes erros, devido à não adequação do modelo ao processo biológico em estudo, é a separação da relação fonte-dreno nos diferentes períodos do ciclo da cultura, mediante a utilização da metodologia de estudo dos componentes do rendimento da cultura.

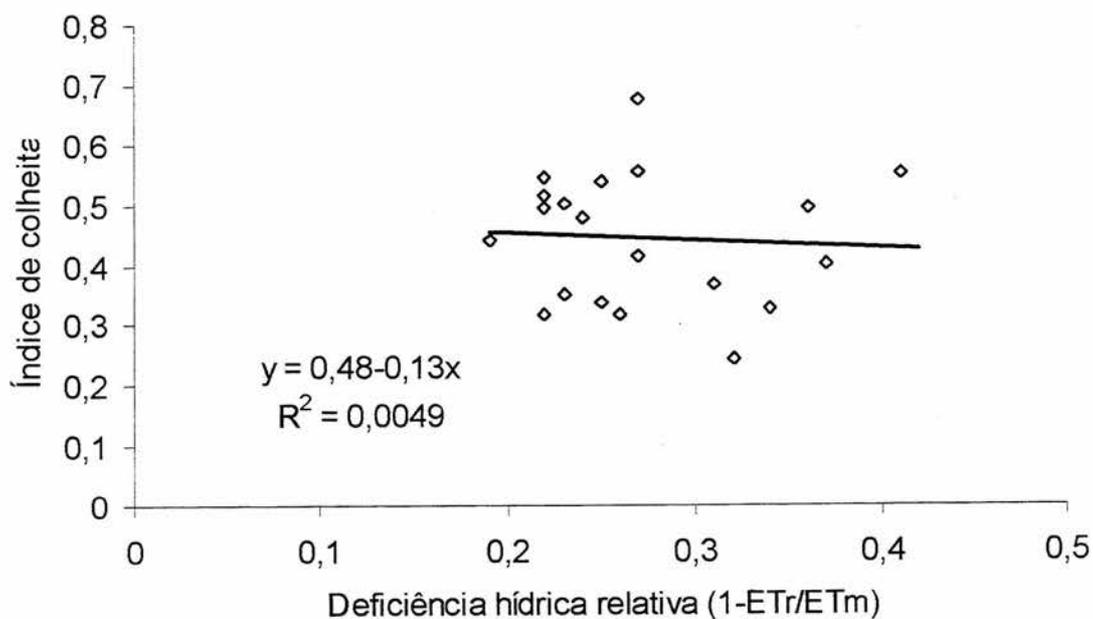


Figura 15. Relação entre o índice de colheita e a deficiência hídrica relativa durante o ciclo do milho (Pioneer 3230 e Pioneer 3063), para os anos agrícolas de 1993 a 1999 e diferentes níveis de irrigação. EEA/UFGRS, Eldorado do Sul, RS.

4.5. Ajuste do modelo de elaboração do rendimento

A avaliação do desempenho de uma população de plantas pelo método de elaboração do rendimento consiste em relacionar os seus componentes, formados em etapas sucessivas para avaliar se este desempenho esteve próximo do potencial, considerando o efeito que os períodos anteriores exercem sobre a relação fonte-dreno da etapa que está sendo avaliada ou estimada. O método da elaboração do rendimento se apresenta, também, como uma ferramenta para a estimativa do rendimento, que é obtido pela multiplicação dos seus componentes.

Durante o período que vai da germinação ao estágio em que a terceira ou quarta folhas estão completamente expandidas, o primeiro componente do rendimento é estabelecido, que é o número de plantas por unidade de área. Nos experimentos, utilizados neste trabalho, este componente foi considerado constante em 66700 plantas por hectare, não sendo avaliado o seu efeito sobre o rendimento.

O período de crescimento da cultura é responsável pelo estabelecimento da área foliar, do crescimento da espiga e do número de flores, portanto determinando o potencial de grãos da cultura. Porém, os processos que envolvem a sua determinação não estão bem esclarecidos e, por isso, o potencial de grãos é de difícil estimativa (Bertrandt, 1991).

O diagnóstico da existência de limitações durante o período de crescimento da cultura ou a estimativa de sua velocidade frente às condições de temperatura, radiação solar e disponibilidade hídrica pode ser feito pelo método energético, apresentado anteriormente, já avaliado para vários híbridos e regiões (Sivakumar e Virmani, 1984; Kiniry, 1991; Tollenaar e Bruulsema, 1988; Sinclair e Horie, 1989; França, 1997), e ajustado para a região ecoclimática da Depressão Central e híbridos utilizados neste trabalho.

Pela falta de conhecimento para estimar o potencial de grãos formados, será avaliado o potencial de grãos viáveis. Este número de grãos viáveis é estabelecido a partir da metade final do período de crescimento vegetativo, quando ocorre a diferenciação e o crescimento da espiga, sendo que a sua efetivação ocorre no período de florescimento e início de enchimento de grãos, quando o fluxo de carboidratos para dentro do grão irá que estabelecer a sua viabilidade ou abortamento.

O desempenho do milho durante o florescimento e início de enchimento de grãos, estabelecido pela relação entre o número de grãos

produzidos por planta e a velocidade de crescimento da planta por unidade de graus-dia, para os experimentos conduzidos neste trabalho, mostra que o número de grãos viabilizados apresentam a mesma tendência de acréscimo linear com a velocidade de crescimento por ocasião do início do enchimento de grãos da encontrada por Bertrandt (1991), apresentada no Apêndice 12.

Contudo a partir da análise dos resultados obtidos no experimento conduzido em Ijuí observa-se que, para uma mesma velocidade de crescimento, a deficiência hídrica reduz mais o número de grãos do que quando a restrição ao crescimento é devida aos outros fatores testados.

A relação aceita para estimar o número de grãos viáveis, em relação à taxa de crescimento da cultura, consegue integrar no seu preditor (velocidade de crescimento no período logo após o florescimento) o efeito de limitações no período de crescimento advindo da menor área foliar produzida e no período crítico de início de enchimento de grãos (Bertrandt, 1991). Por isto é considerada adequada à simulação da dependência entre os componentes do rendimento descritos por Navarro Garza (1984) e proposta por Fleury (1991).

Contudo, no período de polinização a deficiência hídrica um importante fator de redução do número de grãos produzidos, pois pode reduzir o número de óvulos fecundados pela desidratação do pólen, que não consegue o desenvolvimento do tubo polínico, ou do estigma, que quando murcho fecha o canal que conduz ao óvulo impedindo a penetração do tubo polínico (Robins e Domingos, 1953). Desta forma, as limitações hídricas reduzem o número de grãos para além da causada pela menor fotossíntese e conseqüente redução de fotoassimilados translocados para a espiga, como considerado no modelo proposto.

No apêndice 12 pode-se observar que, no experimento conduzido em Ijuí, ocorreu um aumento linear do número de grãos produzidos com o aumento da velocidade de crescimento das plantas, sendo que as situações de maior velocidade de crescimento tem resultados próximos aos obtidos em condições sem restrição hídrica obtidos em Eldorado do Sul.

Desta forma, para estabelecer a relação, na ausência do efeito da deficiência hídrica no florescimento, foram incorporados apenas os ambientes em que a deficiência hídrica relativa $[1-ET_r/ET_m]$ foi menor do que 20% no período de florescimento. O resultado desta relação foi uma equação linear, apresentada na Figura 16, a qual ficaram incorporados basicamente os dados de Ijuí e os dois anos sem deficiência hídrica em Eldorado do Sul (1994/95 e 1997/98).

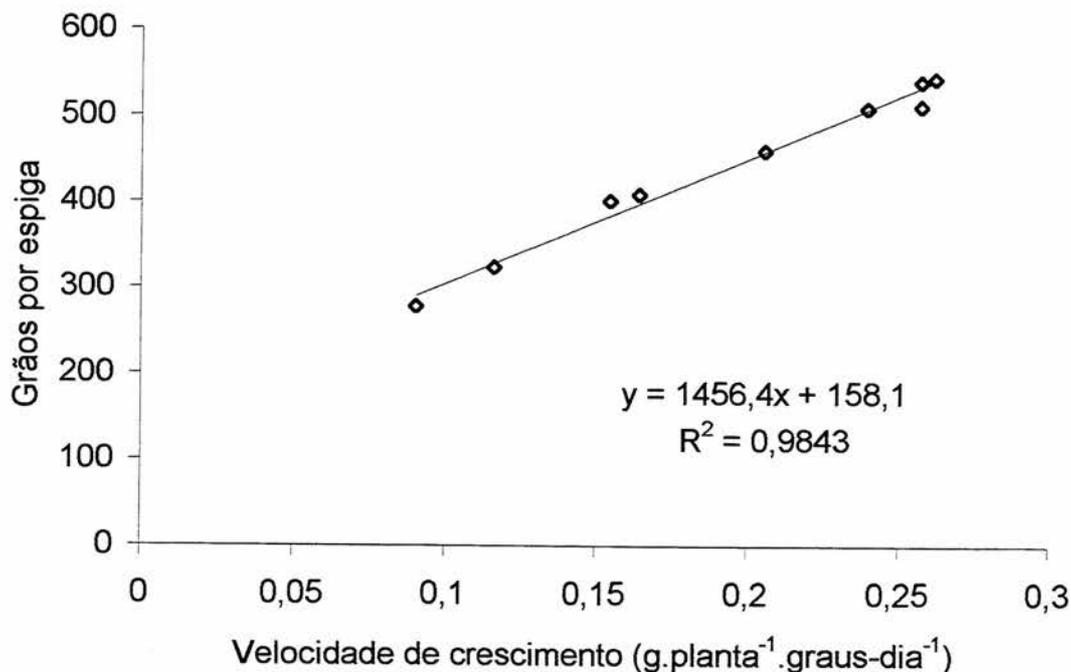


Figura 16. Relação entre o número de grãos por espiga produzidos e a velocidade de crescimento da planta de milho, com deficiência hídrica relativa, no período de dez dias equidistantes do florescimento, menor do que 20%, em experimentos conduzidos no IRDeR, Ijuí, e a EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

Duas importantes informações, obtidas pela confrontação dos resultados da velocidade de crescimento no início de enchimento de grão com o número de grãos produzidos por espiga (Figura 17), em cada tratamento, ano e local utilizados neste trabalho, merecem ser aprofundadas. A primeira é que os tratamentos com maiores níveis de irrigação mantiveram pequena variação de número de grãos, estando em um patamar próximo de 530 grãos por espiga, apesar da velocidade de crescimento variar em cerca de 31% (de 0,225 a 0,325 g.planta⁻¹graus-dia⁻¹).

A partir do prolongamento da equação potencial, ajustada e apresentada na figura 16, verifica-se que existe redução em relação ao número de grãos esperados. O fator responsável por esta limitação, apesar de não comprovado, deve ser a existência de uma limitação do número de grãos por planta de milho, que é de 530 grãos por espiga. Resposta similar com relação ao número de grãos formados por planta foi observado por Kiniry et al. (1998), que obtiveram um potencial de 346 a 777 grãos por planta, variando conforme o híbrido, salientado que este valor potencial de cada híbrido deveria ser obtido em baixas densidades de plantas, e por Andrade et al (1993) cujo intervalo foi de 516 a 740 em densidades de 4,6 a 5,5 plantas por metro quadrado.

Andrade et al. (1993) ainda relacionam a radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada nos 15 dias após o florescimento com o número de grãos por planta, onde se observa que com 50 MJ de radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada é atingido o potencial de grãos por planta, evidenciando que este potencial não é estabelecido apenas pela densidade de plantas. Desta forma o resultado de 530 grãos por planta pode ser considerado o potencial para os híbridos Pioneer 3230 e 3063

A segunda consideração é que os tratamentos com menor nível de irrigação, independente de anos, apresentam redução do número de grãos produzidos, em relação ao potencial estimado. Esta informação é qualitativa mas importante para evidenciar que o método de avaliação da relação de oferta e demanda entre o meio e a população de plantas, durante o florescimento, pode ser avaliada comparando-se o potencial de grãos por espiga, que é a demanda estabelecida no período anterior (crescimento vegetativo) e a oferta do meio, que será inversamente proporcional à queda no rendimento de grãos por espiga em relação ao potencial estabelecido.

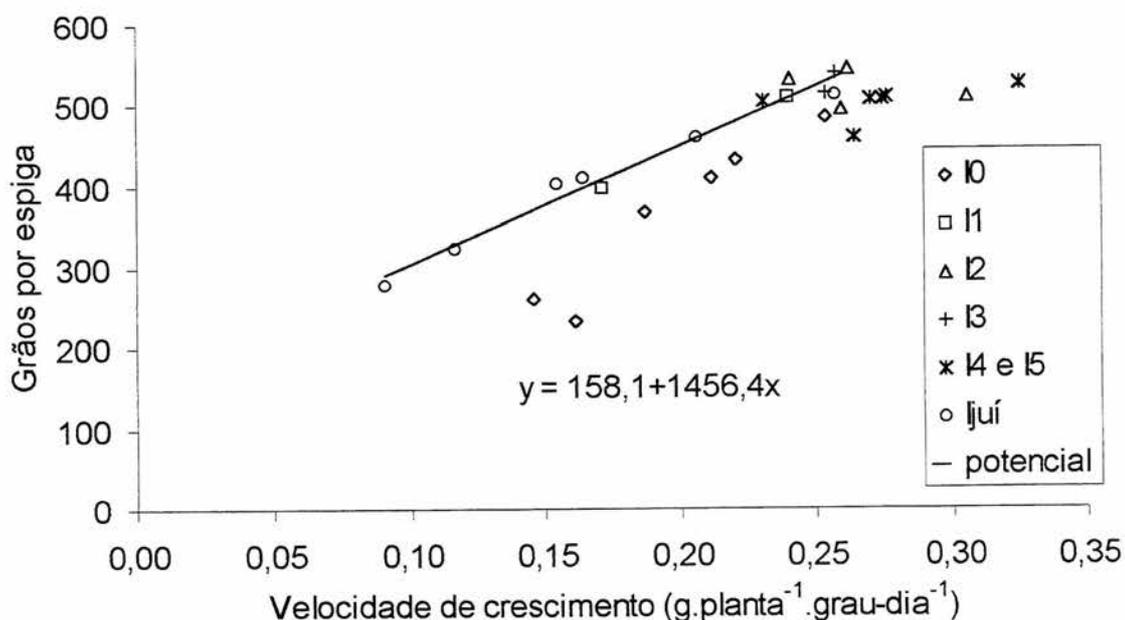


Figura 17. Relação potencial entre o número de grãos produzidos e a velocidade de crescimento da planta de milho, em diferentes níveis de irrigação, em experimentos conduzidos no IRDeR, Ijuí e na EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

A avaliação quantitativa do efeito da deficiência hídrica sobre o desempenho da cultura, no período de florescimento, não produziu referências que permitam estimar o efeito do déficit hídrico. Mas, a aparente núvem de

pontos, resultante da relação entre a perda relativa de grãos por espiga e a deficiência hídrica relativa (Apêndice 13), pode ser explicada quando são incorporadas informações adicionais.

Os resultados da relação entre a perda relativa de grãos por espiga e deficiência hídrica relativa dos tratamentos I4, I3, I2 e I1, no experimento realizado em 1993/94, e de I0 em 1998/99, não apresentaram resultados explicáveis biologicamente, pois com deficiências hídricas relativas entre 0,3 e 0,5 não houve reduções no número de grãos realizados.

No ano de 1993/94 ocorreram precipitações de 15,6 e 12,8 mm no dia do espigamento e no dia posterior. Como o método utilizado para estimativa da deficiência hídrica não é adequado para períodos curtos, devido a aproximações já citadas, a água destas precipitações pode ter sido mais rapidamente disponível do que foi estimado pelo balanço hídrico.

No ano de 1998/99, os resultados de potencial da água no solo e de fluxo de água no colmo permitiram verificar que o aprofundamento do sistema radicular foi maior do que o estimado para o tratamento I1, após o florescimento. Isto permite lançar a hipótese de que, como as restrições hídricas no tratamento I0 foram mais severas, o aprofundamento do sistema radicular foi maior do que o estimado já durante o florescimento e, conseqüentemente também o nível de extração da água do solo pode ter sido maior do que o estimado pelo balanço hídrico.

Considerando estes fatos como verdadeiros, tem-se uma primeira aproximação de equação para a estimativa do efeito da deficiência hídrica durante o florescimento, no qual a perda relativa de grãos por espiga é estimada por uma relação linear a partir da deficiência hídrica ocorrida no período entre 10 dias antes e 10 dias após o florescimento (Figura 18). Cabe ressaltar que os coeficientes de inclinação e de determinação são, em grande

parte, influenciados por apenas dois pontos (os de maior deficiência hídrica e perda relativa de grãos) e, se estes tiverem erros nas estimativas, novos resultados modificarão muito a equação.

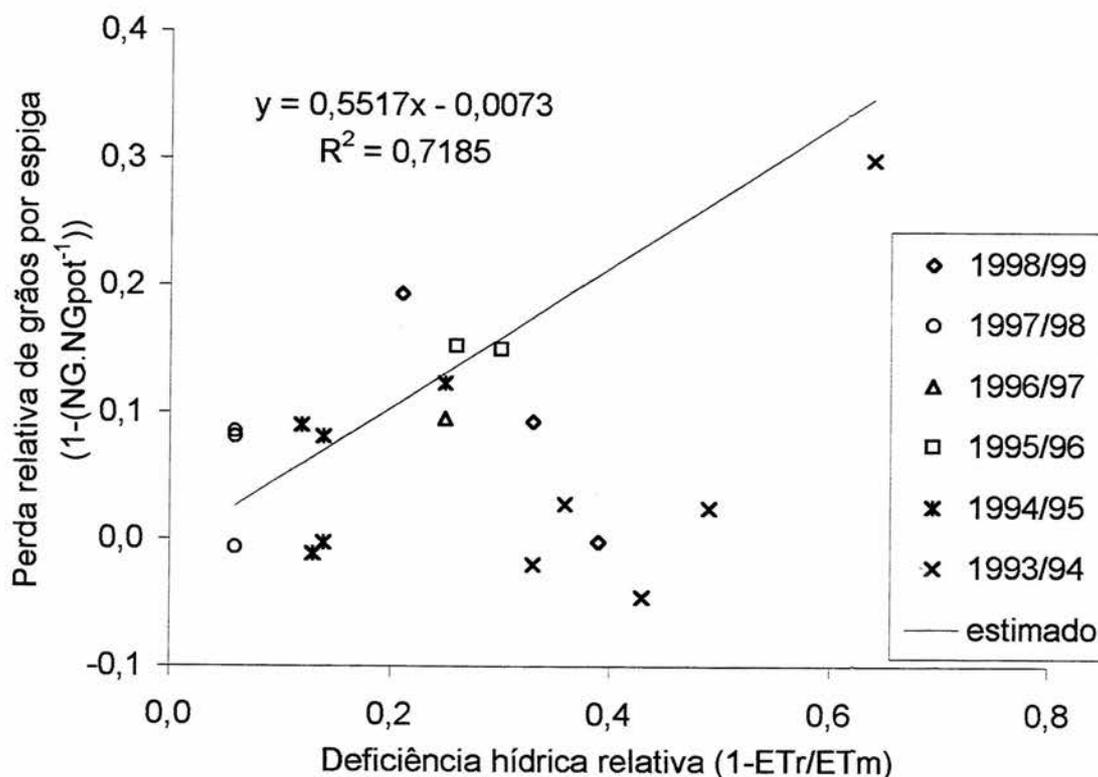


Figura 18. Relação entre a perda relativa de grãos por espiga e a deficiência hídrica relativa no período de dez dias eqüidistante do florescimento do milho (Pioneer 3230 e Pioneer 3063), em diferentes níveis de irrigação, bem como análise de regressão entre estas variáveis, não considerando os resultados obtidos em 1994/95 e o nível zero de irrigação do ano de 1998/99. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

As variações no peso médio de grãos, com 13% de umidade, foram bem menores do que de número de grãos por espiga (Figura 19), sendo que estas ocorrem em altos níveis de grãos por espiga e/ou deficiências hídricas no período de enchimento de grãos.

O potencial de peso médio de grãos é definido pelo potencial genético para o acúmulo de matéria seca em cada grão e pelo potencial de

produção e armazenamento que a planta possui por unidade de grão produzido. O potencial da planta é estabelecido pela quantidade de reservas produzidas ao longo do ciclo e de seu potencial de realocação, bem como pela quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada e utilizada durante o período de enchimento de grãos.

O potencial genético de peso de grão, obtido pela média dos cinco maiores valores de peso médio de grãos, foi de 0,385 g, não tendo participado para o seu estabelecimento as maiores médias obtidas nos anos de 1994/95, 1996/97 e 1997/98 pois o seu peso de grão foi reduzido em todos os níveis de irrigação. Este potencial é um pouco superior aos 0,37 e 0,365 encontrados por Maddonni et al (1998) e Kiniry e Knievel (1995), respectivamente, que avaliaram vários híbridos com diferentes ciclos e tamanhos de espiga. Ressalta-se que, apesar de ser um alto potencial de peso de grãos, este é obtido inclusive em altos números de grãos por espiga, não sendo reduzido pela competição entre grãos em todos os anos. Isto permite deduzir que a época de semeadura utilizada proporciona uma produção de reservas transitórias no início de enchimento de grãos, fotoassimilados durante o período de enchimento de grãos e realocação de fotoassimilados estocados durante o ciclo da cultura, suficientes para atingir o potencial de estocagem da planta nos grãos.

A diminuição do peso médio de grãos com o aumento do número de grãos é indicador de que o potencial da planta limita o peso médio de grãos, sendo que este fato foi observado no ano de 1995/96. No ano de 1997/98, no qual as duas únicas irrigações realizadas precederam precipitações, também houve uma redução generalizada da média de peso de grãos, mas que pode estar confundida com o aumento da deficiência hídrica relativa neste período. Já o ano de 1994/95 também teve uma redução generalizada do peso de

grãos, mas condicionado também por um acamamento provocado por vendaval. O baixo número de ocorrências de limitação do peso de grão pelo potencial da planta, associado ao confundimento de outros fatores como a deficiência hídrica e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada no período, não possibilitaram a estimativa do potencial de peso de grão da planta.

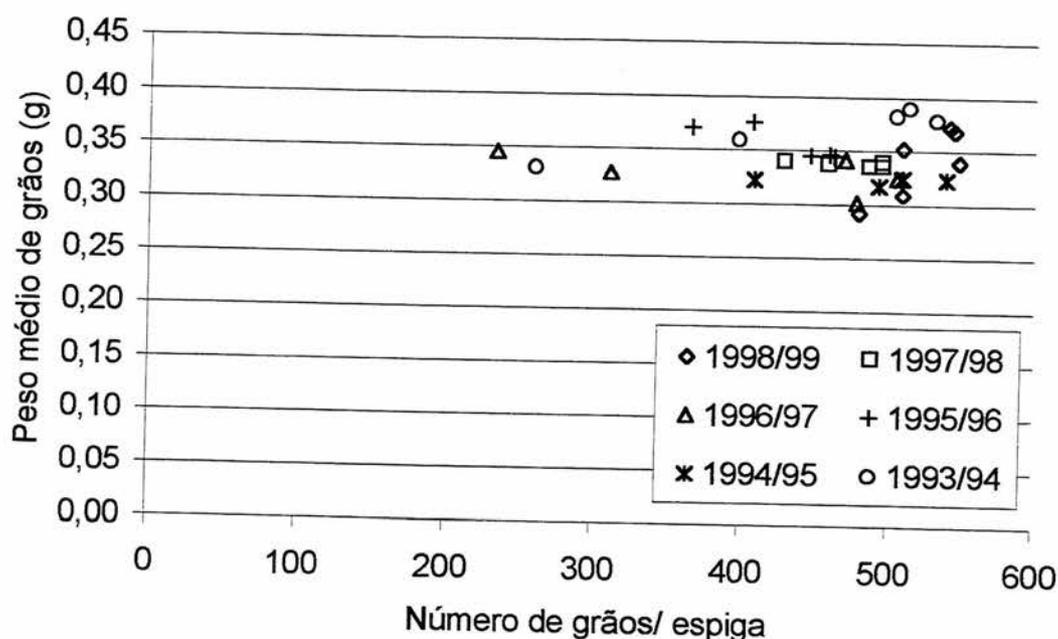


Figura 19. Relação potencial entre o peso médio de grãos e o número de grãos por espiga de milho (Pioneer 3230 e Pioneer 3063) para diferentes anos e níveis de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

A diminuição do peso médio de grãos em menores níveis de irrigação, dentro do mesmo ano, é indicador de que a deficiência hídrica limita o peso médio de grãos. Este fato foi observado somente nos níveis I0 e I1 dos anos 1993/94 e 1998/99, sendo um número de eventos insuficiente para determinar o efeito da deficiência hídrica sobre este componente.

O potencial de rendimento de grãos formados, segundo o modelo de elaboração do rendimento, é estimado pela equação 24. Neste trabalho

considerou-se que o número de plantas por metro quadrado foi constante em 6,67, que os híbridos utilizados mantiveram a produção de uma espiga por planta, o número de grãos por espiga foi limitado em 530 grãos e que o peso médio de grãos manteve-se (mesmo em altos números de grãos por espiga) próximo a um potencial de 0,385 g. Assim, pode-se estimar que o potencial de produção, para esta população de plantas e híbridos, é de 13610 Kg.ha⁻¹, estimado pela substituição dos componentes do rendimento na equação 24, que está apresentada a seguir:

$$rend = 6,67 \times 1 \times 530 \times 0,385 \times 10 = 13610 \text{ Kg.ha}^{-1}$$

Mesmo em condições de altas disponibilidades de radiação solar (assegurada pela época de semeadura) e doses de irrigação que mantiveram o potencial da água no solo acima de -0,3 MPa (em I4 e I5), houve variações entre os rendimentos de grãos de milho, entre os tratamentos I4 e I5, conforme Figura 20.

Estas variações são devidas a deficiências hídricas ocasionais, principalmente causadas pela alta demanda evaporativa próximo ao meio dia, que reduzem a eficiência de uso da radiação solar, diminuindo o número de grãos por espiga. Todavia, a expansão foliar não foi reduzida entre os anos no tratamento I4, que se compensa aumentando a expansão foliar em períodos do dia com menores demandas evaporativas.

As variações de rendimento entre os níveis de irrigação, no mesmo ano, são devidas as diferenças de desenvolvimento que a cultura estava por ocasião da deficiência e, sobretudo pelos níveis de deficiência que ocorreram em cada ano, como já foi analisado anteriormente.

A combinação do método de análise pela decomposição do rendimento, com a incorporação do modelo energético para avaliar o período de crescimento vegetativo, que define o potencial de grãos da lavoura, mostra-

se uma alternativa interessante não somente como estimador do potencial da cultura, mas também como estimador do efeito de deficiências hídricas.

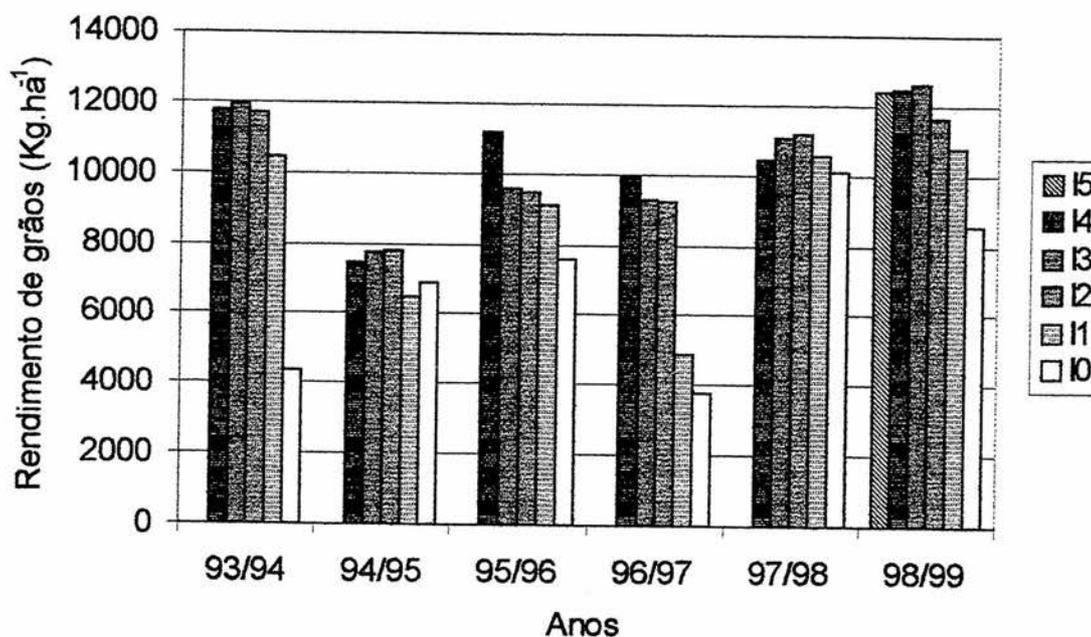


Figura 20. Rendimentos de grãos de milho (Pioneer 3230 e Pioneer 3063) obtidos em diferentes níveis de irrigação e anos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

Apesar do método do balanço hídrico não considerar o efeito da demanda evaporativa sobre a fração de água disponível no solo para as plantas, sendo este um dos fatores determinantes de sua limitação na estimativa de deficiências hídricas ao nível diário, os resultados por apresentarem relações lineares com os coeficientes dos modelos.

Por outro lado, o potencial de peso médio dos grãos deve ser estimado a partir de experimentos específicos, onde a disponibilidade de energia no final do ciclo seja um fator restritivo e variável entre os tratamentos. Da mesma forma, experimentos em que a deficiência hídrica ocorra com maior intensidade no período de enchimento de grãos, poderiam estimar o efeito desta deficiência sobre a perda de potencial de peso de grãos.

5. CONCLUSÕES

O modelo linear segmentado possibilita a estimativa do índice de área foliar do milho em função de graus-dia acumulados, para condições de adequada disponibilidade hídrica.

O aumento da deficiência hídrica relativa da cultura, estimada pelo balanço hídrico diário, diminui a velocidade de formação da área foliar do milho e o índice de área foliar máximo.

Modelos energéticos de estimativa da produção de biomassa aérea em milho podem utilizar tanto a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada como absorvida, pois estas mantêm 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.

A eficiência de uso (ϵ_{uso}) da RFA interceptada tem acréscimo linear durante o período de instalação da cultura, é constante e máxima durante o período de crescimento da cultura até a metade do enchimento de grãos, com posterior redução linear até chegar a zero próximo ao período de rápida senescência foliar.

Para as condições do Rio Grande do Sul a eficiência de uso da RFA em milho, sem limitação hídrica, está dentro da ordem de grandeza prevista para espécies de metabolismo C₄.

A ocorrência de restrição hídrica causa a diminuição da ϵ_{uso} da RFA interceptada, sendo a diminuição proporcional à deficiência hídrica relativa estimada pelo balanço hídrico diário.

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. Contudo, não é possível estimar o rendimento de grãos pela alta variância e a interação de fatores que definem o índice de colheita da cultura.

A velocidade de crescimento da cultura no início do período de enchimento de grãos é um bom estimador da redução do número de grãos por espiga em milho. Havendo deficit hídrico no período de polinização, a perda de grãos por espiga aumenta linearmente com a deficiência hídrica relativa, em relação ao estimado pela velocidade de crescimento da planta durante o enchimento de grãos.

O potencial de peso médio de grãos é limitado pelo potencial da planta em acumular matéria seca por grão produzido e pela produção de fotoassimilados no período de enchimento de grãos.

A deficiência hídrica relativa ($1 - E_{\text{Tr}}/E_{\text{Tm}}$) e a evapotranspiração relativa ($E_{\text{Tr}}/E_{\text{Tm}}$), estimada pelo balanço hídrico diário, têm relações lineares com os coeficientes dos modelos energético e de elaboração do rendimento. Porém, há necessidade de precisão nas estimativas da profundidade do sistema radicular da cultura e da disponibilidade relativa da água no solo, para diferentes níveis de demanda de água pela cultura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, E.; HSIAO, T. S.; HEDERSON, D. W. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to change in water status. **Plant Physiology**, Rockville, v. 48, p. 631-636, 1971.
- ACEVEDO, E. et al. Diurnal growth trends, water potential and osmotic adjustments of maize and sorghum leaves in the field. **Plant Physiology**, Rockville, v. 64, p. 476-480, 1979.
- AFFHOLDER F.; RODRIGUES G. C.; ASSAD E.D. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 32, n. 10, p. 993-1002, 1997.
- AFUAKWA, J.J.; CROOKSTON, R. K. Effect of temperature and sucrose availability on kernel black layer development in maize. **Crop Science**, Madison, v. 24, n. 2, p. 285-288, 1984.
- ALLADOS I.; ALADOS-ARBOLEDAS L. Photosynthetically active radiation: measurements and modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 78, p. 121-131, 1996.
- ALLADOS I.; ALADOS-ARBOLEDAS L. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 93, p. 27-38, 1999.
- ANDRADE F. H.; UHART, S. A.; FRUGONE, M. I. Intercepted radiation at flowering and kernel number of maize: shade versus plant density effects. **Crop Science**, Madison, v. 32, p. 482-5, 1993.

- BERGAMASCHI, H. et al. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, Buenos Aires, v.1, n1, p.23-27, 2001.
- BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R. **Agroclima da Estação Experimental Agrônômica**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia da UFRGS, 1990. 91p. (não publicado).
- BERGONCI, J. I. **Avaliação de indicadores de déficit hídrico em milho**. Porto Alegre, 1997. 117f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- BERLATO, M.; SUTILI, V.; CASTRO, A. Comparação de três métodos de cálculo das exigências térmicas para espigamento do milho (*Zea mays* L.) **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.10, n. 1, p.87-94, 1974.
- BERLATO, M.; SUTILI, V. Determinação das temperaturas bases dos subperíodos emergência-pendoamento e emergência-espigamento de três cultivares de milho (*Zea mays* L.). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO, 11, 1976, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba : Departamento de Genética da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1978. 881p., p. 523-27.
- BERTRAND, M. **Mécanismes de l'elaboration du nombre de grains du maïs (*Zea mays* L.). Valeur predictive d'indicateurs écophysologiques**. Paris : [s.n.], 1991. 185f. Tese (docteur ingénieur "Sciences Agronomique") - Institut National Agronomique, Paris-Grignon.
- BIRCH, C.J.; HAMMER, G.L.; RICKERT, K. J. Improved methods for predicting individuals leaf area and leaf senescence in maize (*Zea mays*). **Australian Journal Agriculture Research**, Toowoomba, v. 49, p. 249-262, 1998.
- BONHOMME, R. et al. Relations entre production de matière sèche aérienne et énergie interceptée chez différents génotypes de maïs. **C. R. Academie Sciences**, Série III, Paris, n. 294, p. 393-397, 1982.
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 704-716, 1996.

- BREITON, C. M.; DODD, J. D. Relationships of photosynthetically active radiation and short wave irradiance. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 17, p. 1-7, 1976.
- BRISSON, N. et al. Proposition d'un modèle semi-deterministe pour la culture du maïs-grain: application a la C. E. E. et au territoire français. In: Comissão des Communautés des Europeennes. **Evaluations des contraintes sol-climat sur la faisabilité des cultures: aplicaciones du maïs grains**. Paris : I.N.R.A. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, 1990.
- CAMARGO, M. B. P. **Exigências bioclimáticas e estimativa da produtividade de quatro cultivares de soja no estado de São Paulo**. Piracicaba : ESALQ, 1984, 96 f. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.
- CHARLES-EDWARDS, D.A. **Physiological determinants of crop growth**. London: Academic Press, 1982. 235p.
- CLASSEN, M. M.; SHAW, R. H. Water deficits on corn: vegetative components. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, p. 649-652, 1970.
- CLAUSNITZER, V.; HOPMANS, J. W. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 164, p. 299-314, 1994.
- COELHO, E. F.; OR, D. A parametric model of two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1039-1049, 1996.
- DELONGUERY, R. L.; CROOKSTON, R. K. Harvest index of corn affected by population density, maturity rating and environment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, p. 557-580, 1979.
- DONALD, C. M. In search of yield. **Australian Journal of Agricultural Science**, [Collingwood], v. 28, p. 171-178, 1962.
- DOOREBOS, J; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma : FAO, 212p., 1979.

- DURÃES, F. O. M. et al. Partição de fitomassa e limitações do rendimento do milho (*Zea mays* L.) relacionados com fonte e dreno. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, São Carlos, v. 5, n. 1, p. 100-112, 1993.
- EDMEANDES, G. O.; DAYNARD T. B. The relationship between final yield and photosynthesis at flowering individual maize plants. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 59, n. 6, p. 585-601, 1979.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA/ Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999. 421p.
- EVANS, L. T. **The physiological basis of crop yield**. London: Cambridge University Press, 1975. 355 p.
- FARIA, R.T. de; MADRAMOOTOO, C.A. Simulation of soil moisture profiles for wheat in Brazil. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 31, p. 35-49, 1996.
- FLESCHE, T. K.; DALE R. F. A leaf index model for corn with moisture stress reductions, **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 1008-1014, 1987.
- FLEURY, A. Metodologie de l'analyse de l'elaboration du rendement. In: PICARD D. **Physiologie et production du maïs**. Paris : INRA, 1990. p. 279-290.
- FLEURY, A. L'elaboration du rendement, outil de diagnostic sur l'effet des techniques. In: PICARD D. **Physiologie et production du maïs**. Paris : INRA, 1991. p. 277-278.
- FRANÇA, S. **Modelagem de crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa, sob diferentes condições hídricas**. Porto Alegre, 1997. 70f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- 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.
- FRETEAUD J. P.; ROSS R.; SARAGONI H. Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques in situ sous culture de maïs. **L'agronomie Tropicale**, [Montpellier], v. 42, n. 2, p. 94-102, 1987.

- 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.
- GILMORE, E. C. Jr.; ROGERS, J. S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 50, p. 151-55, 1984.
- GOLDSWORTHY, P. R.; COLENGROVE, M. Growth and yield of highland maize in Mexico. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 83, p. 223-230, 1974.
- GOSSE, G. et al. Production maximal de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v. 6, p. 47-56, 1986.
- GOVIL, S. R.; PANDEY, H. N. Growth response of maize to crop density. **Indian Journal of Plants Physiology**, Shillong, v. 3, p. 276-278, 1998.
- 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.
- HANCKS, R. J.; RITCHIE J.T. **Modeling plant and soil systems**. Madison : American Society of Agronomy, 1978. 545p.
- HSIAO T. C.; ACEVEDO, E.; HENDERSON, D.W. Maize leaf elongation: continuous measurements and close dependence on plant water status. **Science**, Alexandria, v. 168, p. 590-591, 1970.
- HSIAO T. C.; ACEVEDO, E. Plants responses to water stress. **Annual Review of Plants Physiology**, London, v. 24, p. 519-570, 1973.
- INSTITUTO DE PESQUISAS AGRONÔMICAS. Seção de Ecologia Agrícola. **Observações meteorológicas do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1979. 271p.(Boletim Técnico, 3).
- INSTITUTO DE PESQUISAS AGRONÔMICAS. Seção de Ecologia Agrícola. Porto Alegre, 1989. **Atlas agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul**. V.1. 102p.
- JAME, Y.W.; CUTFORTH, H.W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 76, p. 9-19, 1996.

- JONES, J. W.; MISHOE, J. W.; BOOTE, K. J. Introduction to simulation and modeling. [S.l. : s.n.], 1987. 22p. (Technical Bulletin, 100)
- KINIRY, J. R. Maize physics development. In: **MODELING PLANT AND SOIL SYSTEMS**. Madison : ASA-CSSA-SSSA , 1991. p.55-71. (Agronomy Monograph, 31).
- KINIRY, J.R. et al. Radiation use efficiency in biomass accumulation prior to grain-crop species. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, p. 51-64, 1989.
- KINIRY, J. R.; KNIEVEL D. P. Response of maize seed number to solar radiation intercepted soon after anthesis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, p. 228-234, 1995.
- KINIRY, J. R. et al. Radiation use efficiency response to vapor pressure deficit for maize and sorghum. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 6, p. 265-270, 1998.
- KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relation of plant and soils**. Orlando: Academic Press, 1995. 495p.
- KRIEG D.R. Photosynthetic activity during stress. **Agriculture water management**, Amsterdam, v. 7, p. 249-263, 1983.
- LEGUIZAMÓN ROJAS, C.A. **Alterações físico-hídricas de um podzólico em função do manejo de solo**. Porto Alegre, 1998. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- MADDONNI, G. A.; OTEGUI M. E. Leaf area, light interception, and crop development in maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, n. 3, p. 81-87, 1996.
- MADDONNI, G. A.; OTEGUI M. E.; BONHOMME R. Grain yield components in maize: II. Post silking growth and kernel weight. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 56, p. 257-264, 1998.
- MACGINN, S. M.; KING K. M. Simultaneous measurements of heat, water vapour and CO₂ fluxes above alfalfa and maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 49, p. 331-349. 1990.

- MAJOR, D. J.; BEASLEY, B. W.; HAMILTON, R. I.; Effect of maize maturity on radiation use efficiency. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 895-903, 1991.
- MATZENAUER, R. et al. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento do 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.
- McCREE, K. J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 10, p. 443-453, 1972.
- McCREE, K. J.; SILSBURY, J. H., Growth and maintenance requirements of subterranean clover. **Crop Science**, Madison, v. 18, p. 13-18, 1978.
- McGINN, S. M.; KING, K. M. Simultaneous measurements of heat, water vapor and CO₂ fluxes above alfafa and maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 49, p. 331-349, 1990.
- MOLZ, F.J. Interaction of water uptake and root distribution. **Agronomy Journal**, Madison, v. 56, p. 35-41, 1981.
- 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. **Principles of environmental physics**. London: E. Arnold, 1975. 215 p.
- MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 695-697, 1996.
- MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T.R.; BENNETT, J. M. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 338-343, 1990.
- NAVARRO GARZA, H. **L'analyse des componentes du rendement du maïs. Application a l'étude de la variabilité du rendement dans une petite region**. Paris : [s.n.], 1984. 238f. Tese (docteur ingénieur "Sciences Agronomique") - Institut Nacional Agronomique, Paris-Grignon.

- NOBEL, P. S. **Biophysical plant physiology and ecology**. São Francisco: W. H. Freeman, 1983. 608p.
- PANDOLFO, C. **Parâmetros básicos para o uso na modelagem do rendimento de matéria seca em alfafa (*Medicago sativa* L.)** Porto Alegre, 1995. 128f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- PASSIOURA, J. B. Simulations models: science; snake oil, educations, or engineering? **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 690-694, 1996.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of Royal Society of London**, London, v. 193, p.120-145, 1948.
- PLANTUREUX, S.; GIRARDIN, Ph. ; VINCENT G. Prise en compte du stress hydrique dans CERES-Maize. In: PICARD D. **Physiologie et production du maïs**. Paris : INRA, 1990. p.469-78.
- RADIN, B. **Evapotranspiração máxima do milho, medida em lisímetro e estimada pelo modelo Penman-Monteith modificado**. Porto Alegre, 1998. 97 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- ROBIN, J. S.; DOMINGOS, C. E. **Agronomy Journal**, Madison, v. 45, p. 612-, 1953.
- RUGET, F.; BONHOMME. R.; VARLET-GRANCHER Analyse de la fonction de photosynthèse dans CERES-Maize. In: PICARD D. **Physiologie et production du maïs**. Paris : INRA, 1990. p.319-28.
- RUSSEL, G.; JARVIS, P. G.; MONTEITH, J. L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: RUSSEL, G.; MARSHALL, B.; JARVIS, P. G. **Their growth, form and function..** Cambridge University Press : Cambridge, 1989. p.31-40. (Society for experimental biology seminar series 31)
- SANTOS, A.O. **Simulação da perda d'água dos estratos ensolarado e sombreado de um dossel de milho (*Zea mays* L.), sob diferentes condições de disponibilidade hídrica**. Porto Alegre, 1998. 161 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Programa de Pós-graduação em Agronomia,

Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 1998.

- SIVAKUMAR, M. V. K.; VIRMANI, S. M. Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 31, p. 131-141, 1984.
- SINCLAIR, T. R.; HORIE, T. Crop physiology and metabolism. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, Madison, v. 29, p. 90-98, 1989.
- SINCLAIR T. R., SHIRAIWA T. ; HAMMER G. L. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation. **Crop Science**, Madison, v. 32, p. 1281-1284, 1992.
- SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.G. Crop modeling: from infancy to maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 698-704, 1996.
- STOCKLE, C.; CAMPBELL, G. A simulation model for predicting effect of water stress on yield; an example using corn. In: HILLEL, D. **Advances in Irrigation**. New York : Academic Press, 1985. v.3.
- TARDIEU, F.; BETHENOD, O. Quels indicateurs du fonctionnement hydrique des plantes permettent de rendre compte de rendement du maïs?. In: PICARD D. **Physiologie et production du maïs**. Paris : INRA, 1990. p.319-28.
- TIMOTHY, J. A.; NORMAN, J. M.; SULLIVAN, C. Y. From cell growth to leaf growth: I. Coupling cell division and cell expansion. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, p. 99-105, 1995a.
- TIMOTHY, J. A.; NORMAN, J. M.; SULLIVAN, C. Y. From cell growth to leaf growth: II. Simulation of a file of cells. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, p. 106-112, 1995b.
- TIMOTHY, J. A.; NORMAN, J. M.; SULLIVAN, C. Y. From cell growth to leaf growth: III. Kinetics of leaf expansion. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, p. 112-121, 1995c.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Climatologia**, Centerton, v. 10, n. 3, p.156-198, 1955.

- TOLLENAAR, M.; BRUULSEMA, T. W. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 580-585, 1988.
- TOLLENAAR, M.; HUNTER, R. B. A photoperiod and temperature sensitive period for leaf number of maize. **Crop Science**, Madison, v. 23, p. 457-460, 1983.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.
- VAN VOLKENBURGH, E.; BOYER, J.S. Inhibitory effects of water deficit on maize leaf elongation. **Plant Physiology**, Rockville, v. 77, p. 190-194, 1985.
- 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.
- WANG, J. Y. A critique of heat unit Approach to plant response studies. **Ecology**, Washington, v. 41, n. 4, p. 785-790, 1960.
- WILLIAMS, W. A.; LOOMIS, R. S.; LEPLEY, C. R. Vegetative growth of corn as affected by population density. I. Productivity in relation to interception of solar radiation. **Crop Science**, Madison, v. 5, p. 211-215, 1965.

7. APÊNDICE

Apêndice 1. Percentuais dos níveis de irrigação, aplicados nos diferentes tratamentos e anos, em relação à dose de rega necessária para manter a umidade do solo em capacidade de campo, EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

Nível do fator irrigação	1993/94	1994/95	1995/96 a 1997/98	1998/99	1998/99
				com plantas ¹	sem plantas ²
I5 ³				100	100
I4	150	100	100	116	93
I3	100	75	98	58	54
I2	77	47	80	25	60
I1	50	28	26	0	7,5
I0	0	0	0	0	0

¹ Medições feitas na base das plantas, durante o período de enchimento de grãos.

² Medições feitas após a retirada das plantas (após a colheita).

³ O nível I5 foi aplicado pelo uso de duas linhas de aspersores, estando localizado entre as mesmas (Figura 2).

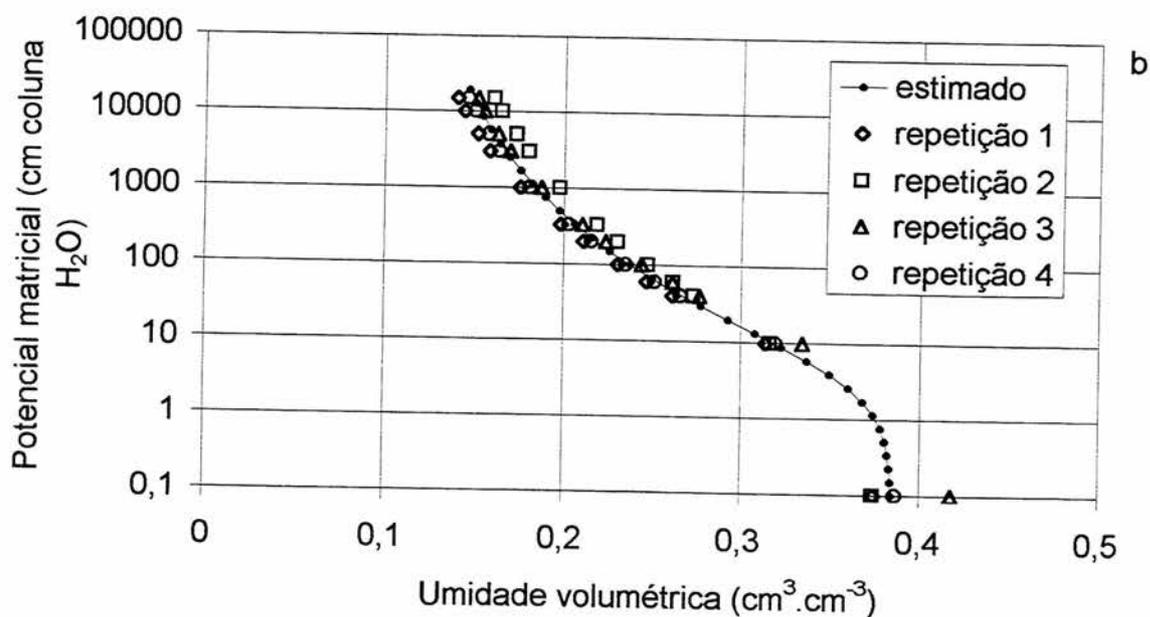
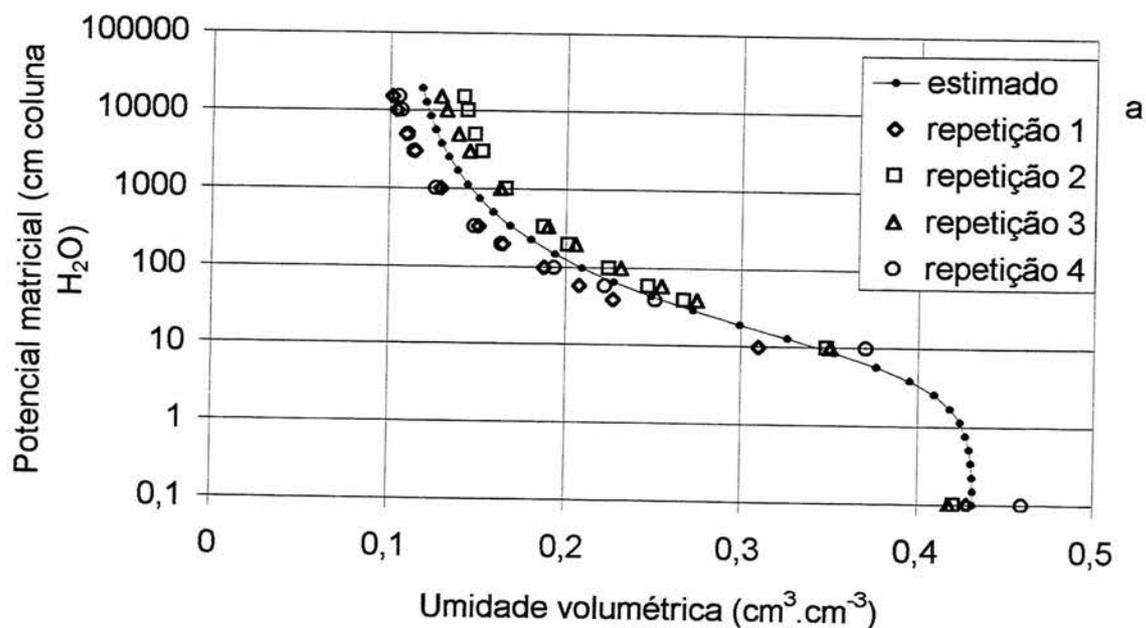
Apêndice 2. Datas e lâminas de irrigação aplicadas no tratamento com a dose de rega necessária para manter a umidade do solo próxima da capacidade de campo nos diferentes anos agrícolas, EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

1993/94		1994/95		1995/96		1996/97		1997/98		1998/99	
data	dose (mm)										
21/11	22,5	16/12	39,0	25/11	14,1	30/11	17,4	21/12	13,6	28/11	13,4
23/11	25,5	23/12	42,0	28/11	6,1	6/12	17,7	28/1	13,6	2/12	13,4
29/11	13,5	29/12	18,0	5/12	18,6	13/12	28,5			7/12	16,7
1/12	22,5	6/1	27,0	9/12	34,3	28/12	35,2			26/12	16,7
4/12	39,0	23/1	21,0	12/12	35,9	3/1	33,4			2/1	16,7
7/12	30,0	1/2	17,0	17/12	40,2	13/1	46,6			6/1	16,7
14/12	45,0	9/2	15,0	5/1	30,2	24/1	34,6			9/1	20,1
18/12	18,0			23/1	29,8					11/1	20,1
21/12	28,5			16/2	23,5					14/1	5,0
1/1	61,5									18/1	20,1
										23/1	23,4
										31/1	16,7
										12/2	10,0
total	306,0	total	179,0	total	232,7	total	213,4	total	27,2	total	209,0

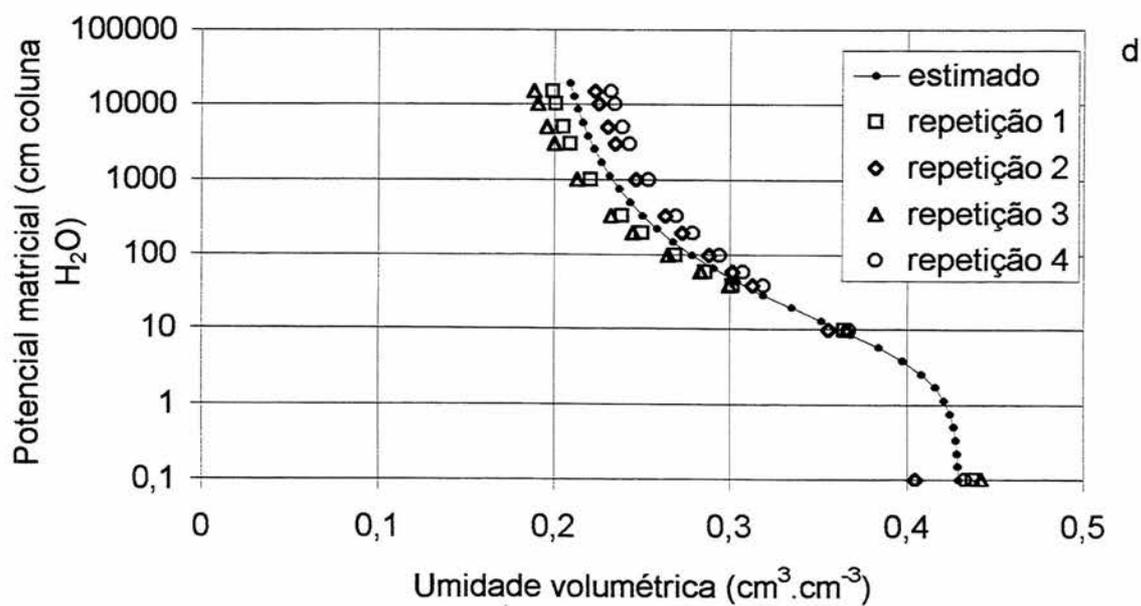
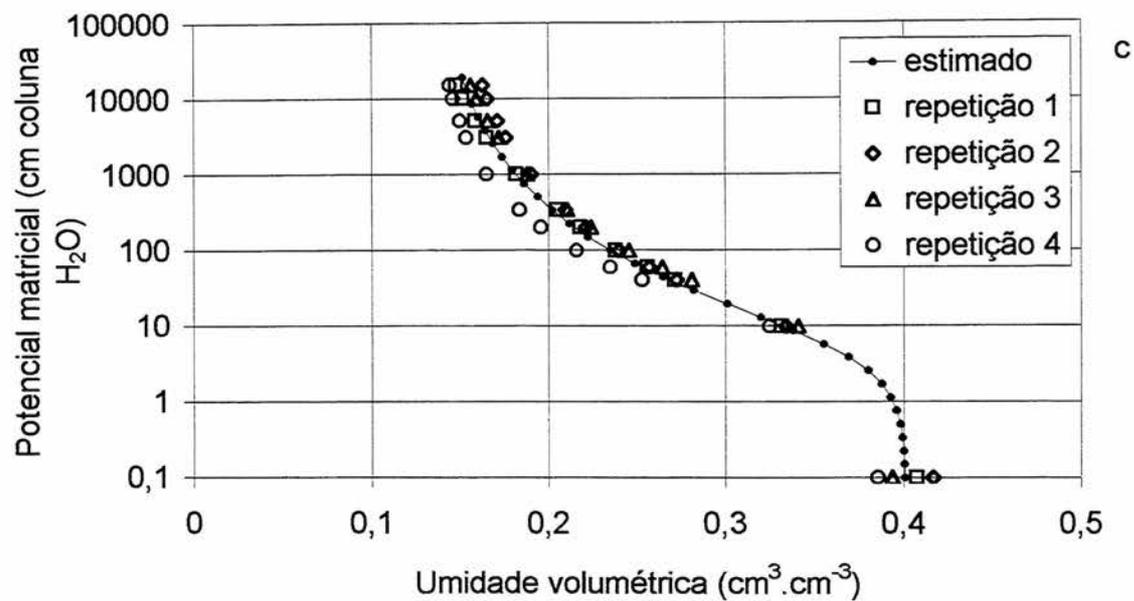
Apêndice 3. Práticas culturais aplicadas nos experimentos em diferentes anos, EEA/UFRRS, Eldorado do Sul, RS.

Anos	Antecedente	Preparo do solo	Adubação nitrogenada (Kg.ha ⁻¹ de N)	Data de semeadura e híbrido	Controle plantas daninhas	Controle de pragas
1993/94	aveia	aração e gradagem em dois sentidos + duas gradagens	40 na base +40 +40 em cobertura	28/10 Pioneer 3230	atrasine + methalachlor+ 2 capinas + glifosate	deltrametrina (lagarta do cartucho)
1994/95	aveia	aração + gradagem	40 na base +40 +40 em cobertura	04/11 Pioneer 3230	trifluralin + atrasine + 2 capinas + glifosate	deltrametrina (lagarta do cartucho)
1995/96	aveia + ervilhaca	rolo faca + aração + gradagem	40 na base +40 +60 em cobertura	25/10 Pioneer 3230	paraquat + capina	
1996/97	aveia + ervilhaca	aração + gradagem	40 na base +40 +60 em cobertura	29/10 Pioneer 3230	atrasine + methalachlor+ nicosulfuron	
1997/98	aveia + ervilhaca	aração + gradagem	40 na base +40 +60 em cobertura	24/10 Pioneer 3065	atrasine + methalachlor+ 2 capinas	deltrametrina (lagarta rosca)
1998/99	aveia + ervilhaca	aração + gradagem	40 na base +60 +60 em cobertura	22/10 Pioneer 3065	nicosulfuron + 2 capinas + paraquat	deltrametrina (lagarta da espiga)

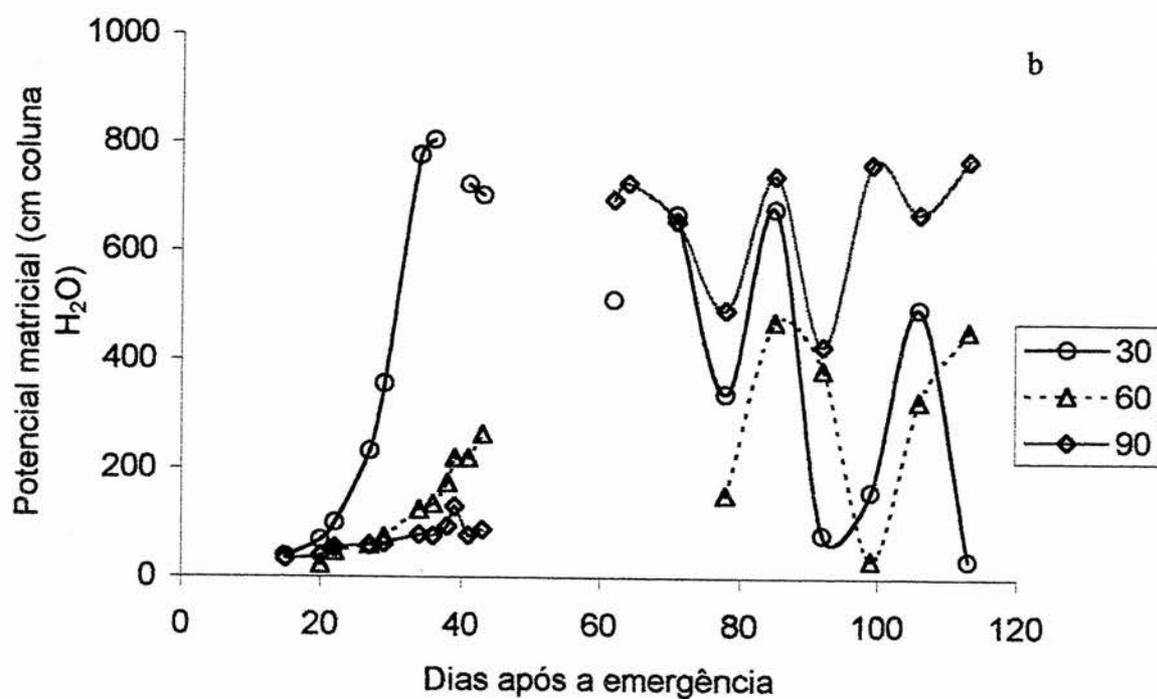
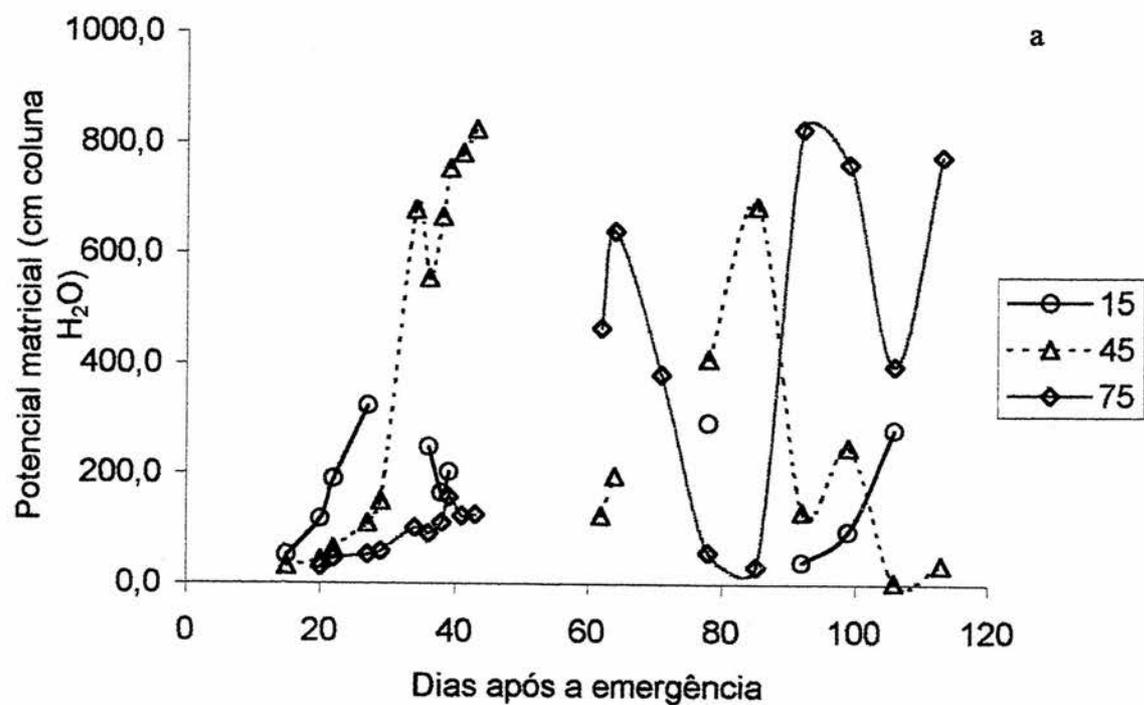
Apêndice 4. Relação entre potenciais matriciais da água (médio) no solo e umidade em base volumétrica nas profundidades de 15 cm (figura a), 30 cm (figura b), 45 cm (figura c) e 60 cm (figura d), em amostras retiradas de diferentes níveis de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 1999.



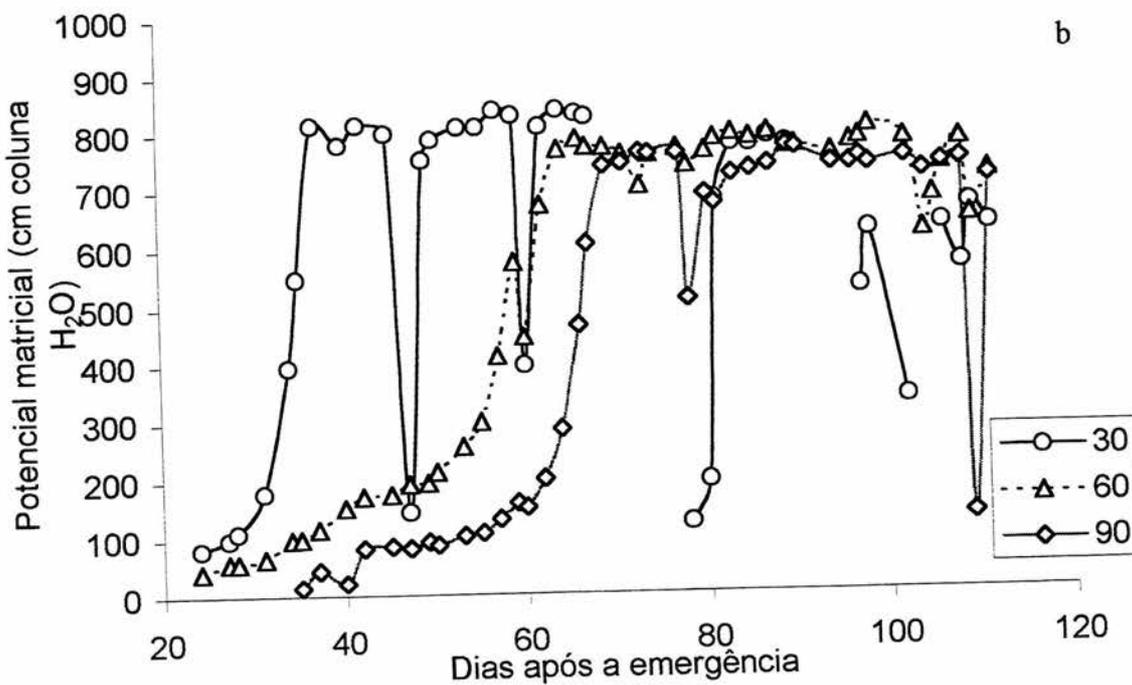
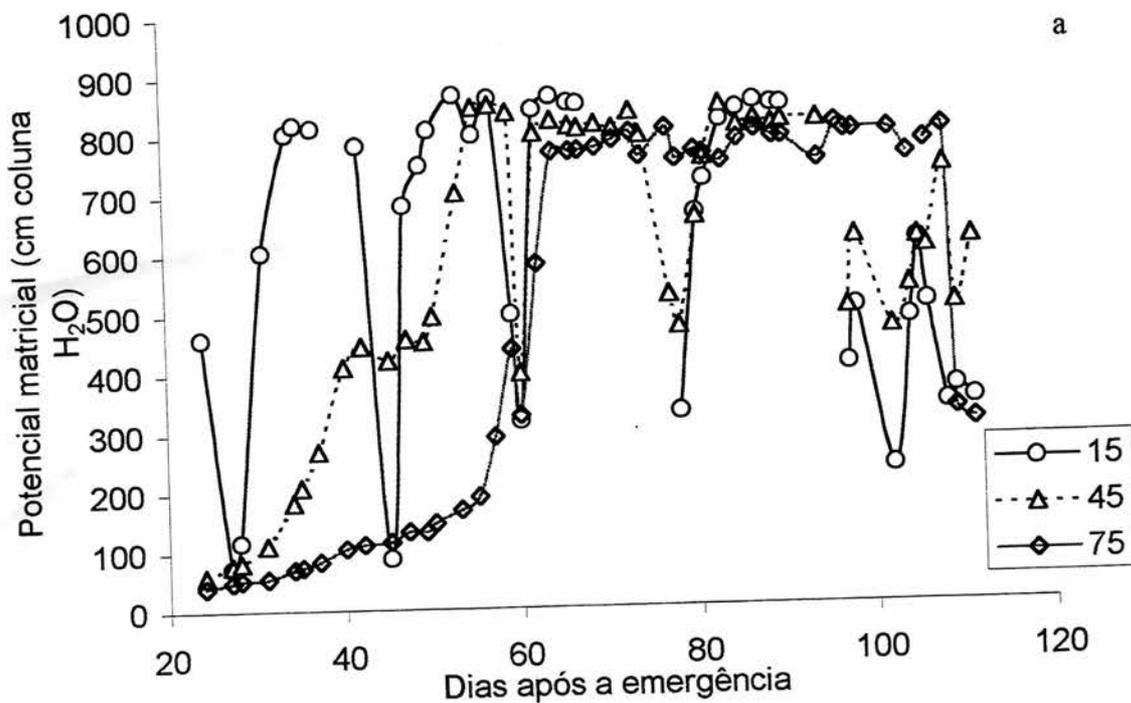
Apêndice 4. Continuação...



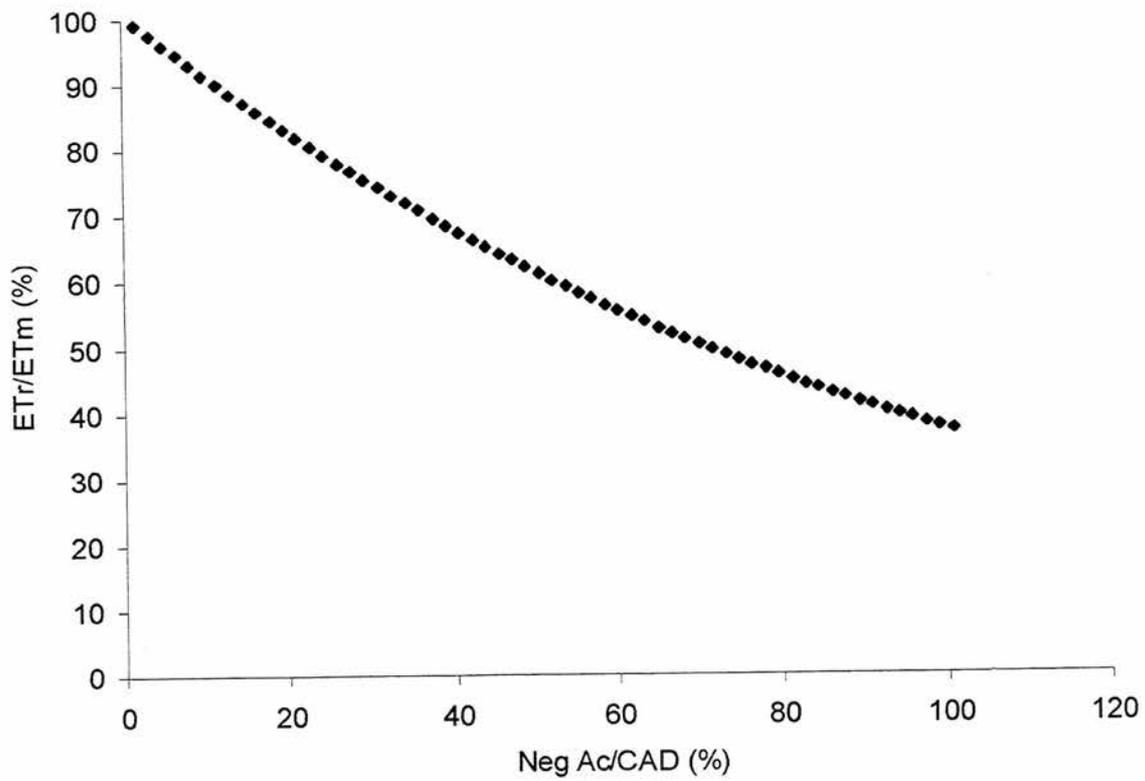
Apêndice 5. Potenciais matriciais da água no solo, nas profundidades de 15, 45 e 75 cm (figura a), e 30, 60 e 90 cm (figura b) em função dos dias após a emergência, no ano de 1996/97. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.



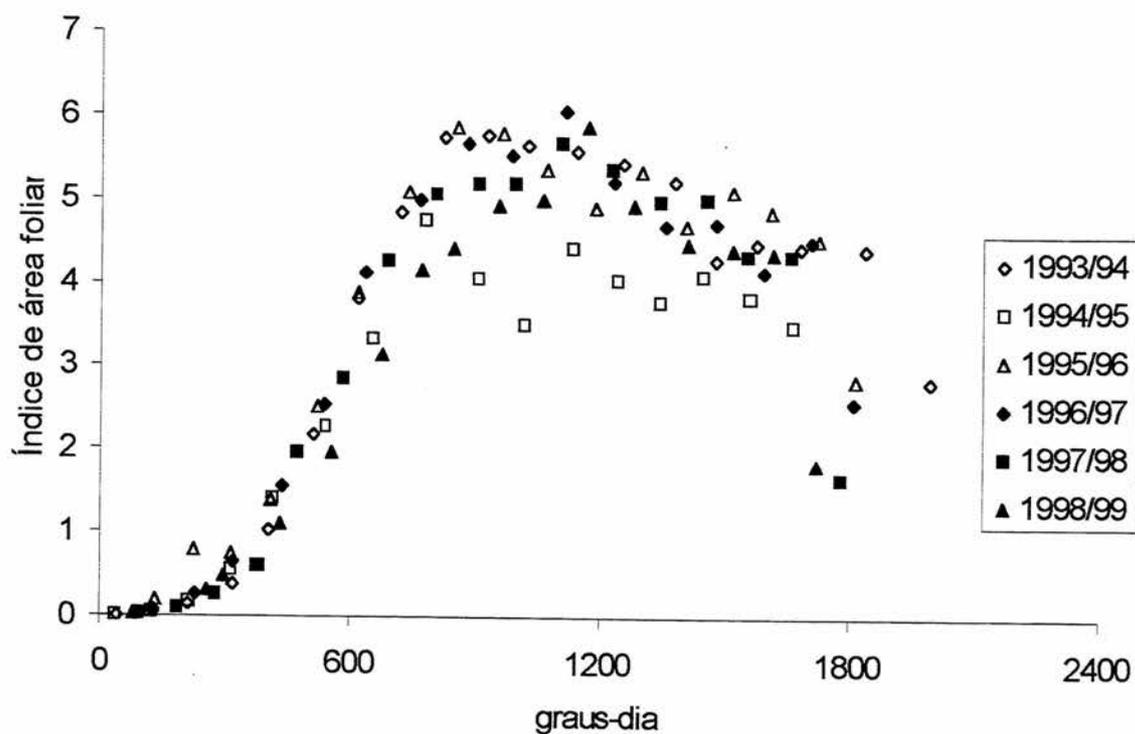
Apêndice 6: Potenciais matriciais da água no solo nas profundidades de 15, 45 e 75 cm a e 30, 60 e 90 cm b em função de dias após a emergência, no ano de 1998/99. EEA/UFRGS, RS.



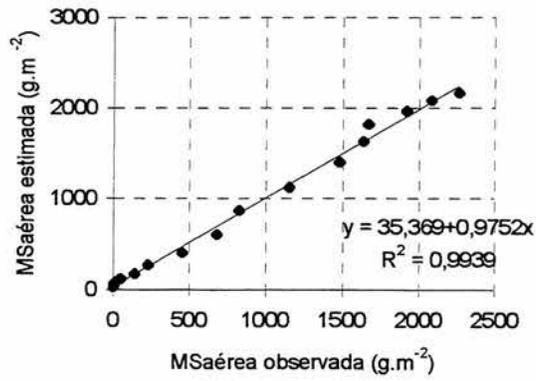
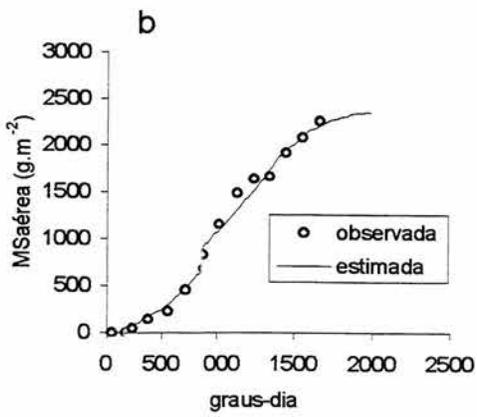
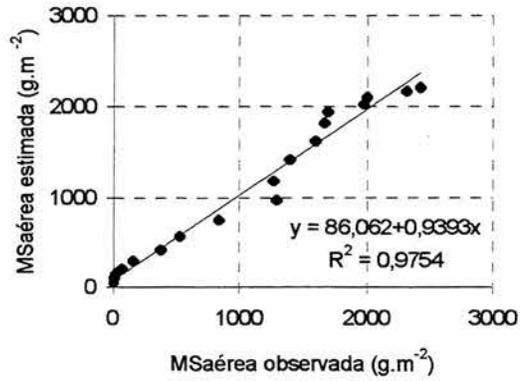
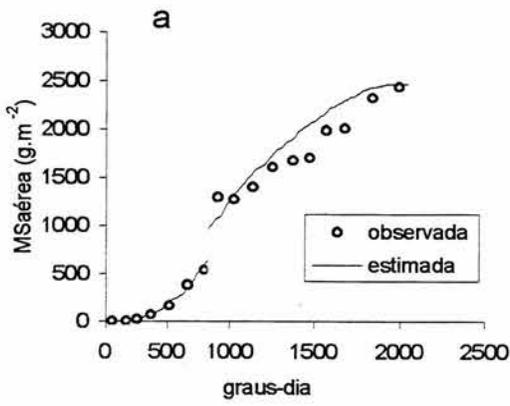
Apêndice 7. Percentuais de consumo relativo de água (ET_r/ET_m) em função da razão percentual entre o balanço pluviométrico negativo acumulado ($NegAc$) e a capacidade de água disponível no solo (CAD), para o modelo de balanço hídrico adotado.



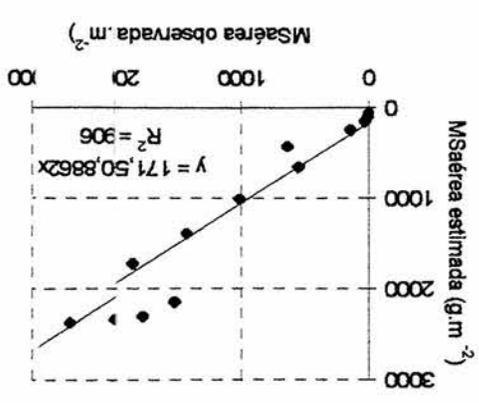
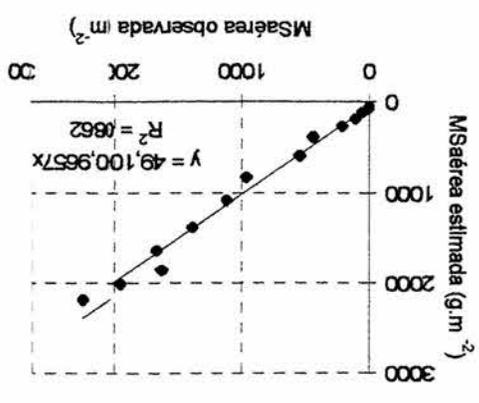
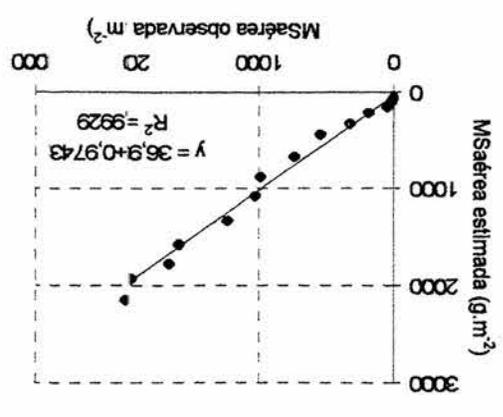
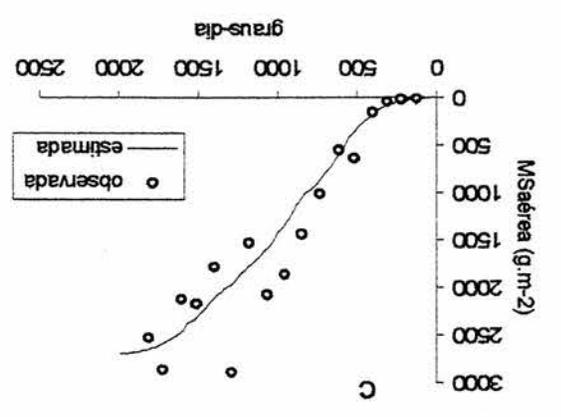
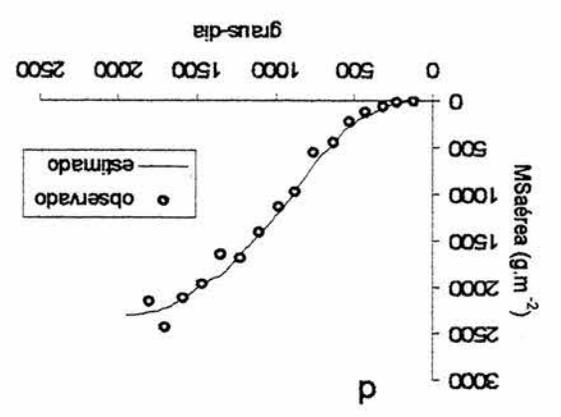
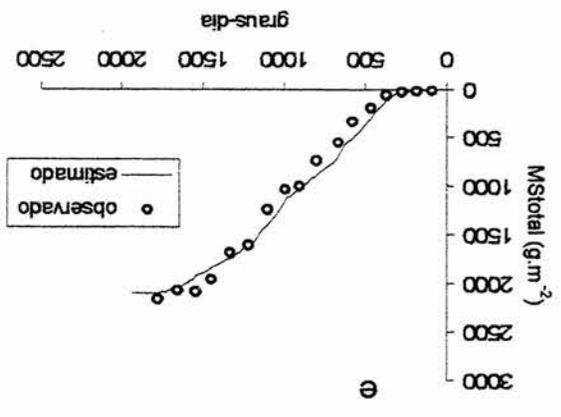
Apêndice 8. Evolução do índice de área foliar em função da soma de graus-dia acumulados para o milho (Pioneer 3230 de 1993/94 a 1996/97 e Pioneer 3063 em 1997/98 e 1998/99) em solo mantido próximo a capacidade de campo. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.



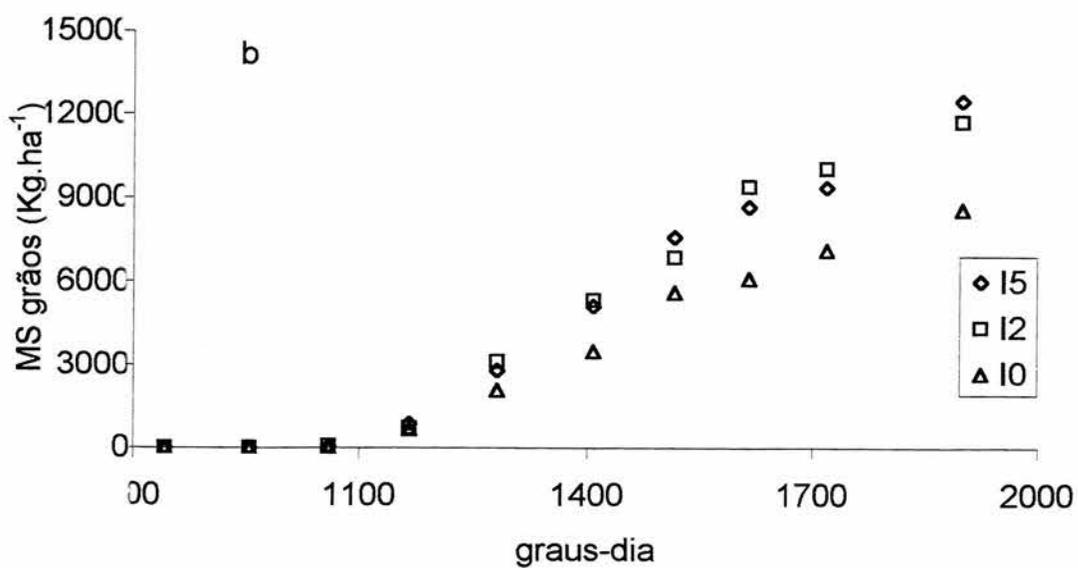
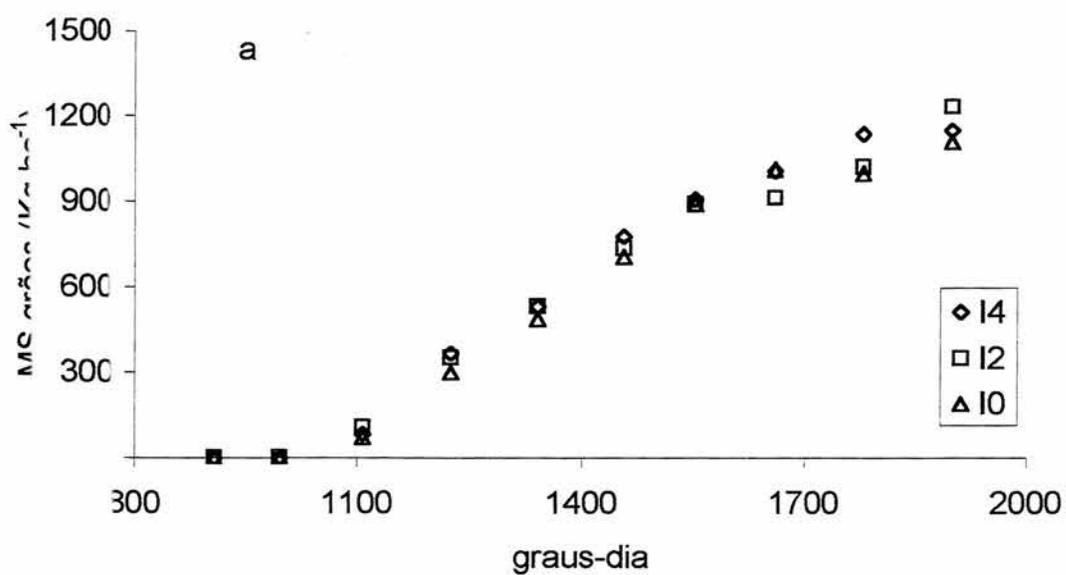
Apêndice). Masa de matéria seca aérea observada em função de graus-dia acumulados, nos anos 1993/94 (a), 1994/95 (b), 1995/96 (c), 1996/97 (d) pra o híbrido Pioneer 3230 e 1997/98 (e) para o híbrido Pioneer 3063acompanhadas pelas relações entre as massas de matéria seca aérea:acumuladas estimada e observada. EEA/UFRGS,Eldorado do Sul, B.



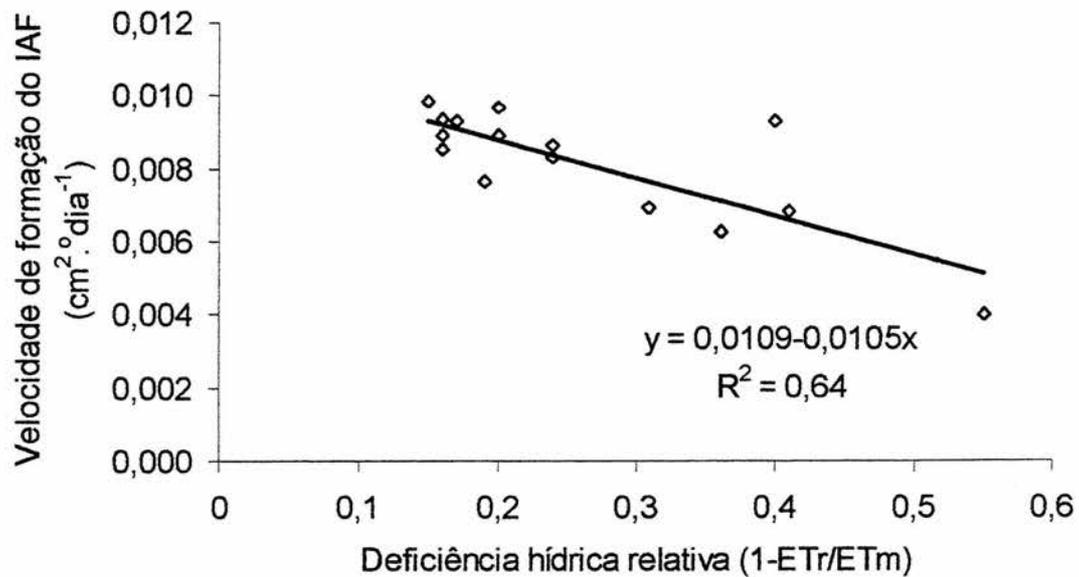
Apêndice 9. Continuação.....



Apndice 0. Massa de matéria seca (MS) de grãos de milho em função de graus-dia acumulados nos anos de 1997/98 (figura a) e 1998/99 (figura b), EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.



Apêndice 11. Velocidade de formação do índice de área foliar (IAF) em função da deficiência hídrica relativa em milho (Pioneer 3230 e Pioneer 3063), nos anos agrícolas de 1993/94 e de 1995/96 a 1998/99. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.



Apêndice 12. Número de grãos por espiga, em função da velocidade de crescimento da planta de milho, em experimentos conduzidos no IRDeR (Ijuí) e na EEA/UFRGS (Eldorado do Sul), RS, e em diferentes regiões da África e Europa (Bertrandt, 1991).

