

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DAS NECESSIDADES DE IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR NO RIO GRANDE DE SUL

Alberto Elvino Franke

Universidade Federal de Santa Catarina
Rod.BR 280, Km 27
98245-000 Araquari, SC

Raul Dorfman

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Caixa Postal 15029
91501970 Porto Alegre, RS

RESUMO

*Este trabalho de pesquisa foi conduzido com a finalidade de estimar as necessidades estocásticas de irrigação suplementar na cultura do milho (*Zea mayz* L.), nas regiões agroecológicas do Estado do Rio Grande do Sul, denominadas de Planalto Médio e Missões. Na simulação das necessidades de irrigação, através de um modelo de balanço hídrico, usou-se uma série de 10 anos de dados meteorológicos diários das estações meteorológicas de Cruz Alta e Passo Fundo, RS. As necessidades foram simuladas para a combinação entre: locais (região agroecológica das Missões e Planalto Médio); épocas de semeadura (01/set, 15/set, 01/out, 15/out, 01/nov, 15/nov, 01/dez, 15/dez); níveis de manejo da irrigação (para 100, 90, 80, 70, 60% do potencial produtivo das culturas) e níveis de risco (2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40%). Os resultados indicam que: as necessidades de irrigação suplementar são máximas para a semeadura em 15 de outubro, declinando para as semeaduras realizadas antes e após esta data, sendo os menores valores encontrados na semeadura de 15 de dezembro; as necessidades de irrigação suplementar são maiores nas condições agroecológicas das Missões quando comparadas com as do Planalto Médio; as lâminas de irrigação suplementar estimadas aumentam à medida que o nível de risco diminui.*

INTRODUÇÃO

A variabilidade temporal e espacial no rendimento das principais culturas agrícolas no Estado do Rio Grande do Sul está associada, entre outros fatores, com a ocorrência de déficits hídricos pronunciados no solo. Estes déficits hídricos ocorrem durante os meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro, como consequência da aleatoriedade temporal e espacial da precipitação.

Apesar da chuva no Estado ser bem distribuída nas quatro estações do ano, a normal de verão é, em geral, insuficiente para atender as necessidades hídricas das culturas, principalmente no sul do Estado, determinando rendimentos inferiores aos que se conseguiria com suprimento adequado de água (Berlato, 1992). Para o mesmo autor, os meses de janeiro e fevereiro são os mais críticos à produção de cereais e oleaginosas, porque as médias normais apresentam deficiências hídricas que coincidem com os períodos críticos das culturas ao déficit hídrico. A frequência de ocorrência de estiagens é maior que em qualquer época do ano, cerca de 27%.

A maior causa da variação dos rendimentos está associada a quantidade e distribuição das chuvas. Igualmente são importantes os estudos que visam definir as reais necessidades de irrigação para os diferentes climas e solos do Estado, através de balanços hídricos e estudos de frequência dos déficits. Já que a média de valores geralmente não espelha a realidade, sobretudo na agricultura, as necessidades de

irrigação ficam melhor caracterizadas através da análise de frequência, conhecendo-se, desta forma, valores das necessidades máximas que podem ser atingidas ou ultrapassadas com determinada frequência.

Para o solo da Unidade de Mapeamento Passo Fundo, na região do Planalto Médio, Beltrame et al. (1979) concluíram que existe apenas 12% de probabilidade de ocorrer déficits hídricos nos meses de janeiro e fevereiro e 5% no mês de dezembro. Num estudo conduzido por Mota (1980) são apontadas necessidades de irrigação, nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio, de 582; 455; 212 e 0mm para riscos de 10; 20; 50 e 80%, respectivamente. Nas condições de solo e clima Santo Ângelo, a necessidade é de 772; 616; 319 e 43mm para riscos de 10; 20; 50 e 80%, respectivamente.

Mota e Agendes (1989), encontraram uma necessidade de irrigação variando entre 142,2 a 300,2mm, em 80% do tempo, em função dos limites inferiores de disponibilidade hídrica adotados na irrigação, por aspersão, para solo Passo Fundo.

Para a região das Missões, solo da Unidade de Mapeamento Santo Ângelo, Beltrame et al. (1979) afirmam que, nos meses de novembro a março, existem as maiores probabilidades de ocorrer déficit hídrico. No mês de dezembro esta probabilidade é de 30 % e, nos meses de janeiro e fevereiro, está na ordem de 40 % e 33 % respectivamente. Assim, os autores recomendam a adoção da irrigação suplementar nesta condição edafoclimática. Para este solo, Mota e Agendes (1989) encontraram uma necessidade de irrigação anual variando entre 224,2 a 396,8mm, em 80% do tempo, para irrigação por aspersão. Caso fosse adotada a irrigação por sulcos esta necessidade anual seria entre 285,3 a 505,0mm.

Verifica-se, entre as fontes consultadas, que há discordância em relação a magnitude e probabilidade de ocorrência dos déficits hídricos. Estas diferenças podem ser atribuídas às diferentes metodologias de balanço hídrico adotadas, à base de dados usada e, principalmente, à profundidade da

camada de solo explorada pelas raízes. Isto ocasiona diferentes capacidades de água disponível às plantas; conseqüentemente, maiores déficits hídricos podem ser suportados pelas plantas e, assim, os modelos simulam menores lâminas ou menor frequência dos déficits.

Conforme FEPAGRO (1996) as chuvas no Estado não são suficientes para atender às demandas hídricas da cultura do milho e recomenda que se procure minimizar as perdas através do manejo da cultura (via antecipação da época de semeadura, uso de cultivares mais adaptadas, menor densidade de semeadura e controle das ervas daninhas) ou pela irrigação.

Matzenauer (1980) afirma que o conhecimento das necessidades hídricas durante o ciclo de desenvolvimento do milho e em cada subperíodo são instrumentos importantes no caso de necessidade de suplementação de água ou no planejamento de sistemas de irrigação, bem como em ajustamentos de épocas de semeadura em função das disponibilidades hídricas da região considerada, determinando, assim, maior eficiência no aproveitamento das precipitações pluviométricas.

A cultura do milho apresenta uma importância sócio-econômica muito grande para o Rio Grande do Sul em função: da expressiva área cultivada; do grande número de mini e pequenos produtores rurais que o cultivam; da grande proporção da produção deste cereal que é usada como insumo na produção pecuária e da participação no esquema de rotação de culturas de verão, aumentando a sustentabilidade da agricultura gaúcha.

O consumo de água para uma mesma cultivar varia em função do genótipo (ciclo, área foliar, estatura e sistema radicular), do tipo de solo e das condições meteorológicas reinantes. Pesquisas feitas por Jensen (1973) e Doorenbos e Kassan (1979) demonstraram que a necessidade de água durante o ciclo do milho varia de 373 a 640mm e 500 a 800mm, respectivamente, considerando diversos locais e períodos. Matzenauer (1980) determinou que o milho consome 573mm (ciclo de 124 dias nas condições da Depressão Central)

para completar o ciclo e que o consumo médio diário foi de 4,6mm. Cardoso (1995) apresenta estimativas de consumo hídrico de 559,2 mm e 527,2mm no ciclo, para épocas de semeadura em outubro e novembro, respectivamente. Constatou, portanto, que a época de semeadura em outubro acarreta a maior necessidade hídrica.

Numa pesquisa conduzida em lisímetros de drenagem para determinar o efeito da tensão da água no solo sobre o rendimento da cultura do milho, Lamb (1991) aplicou lâminas de irrigação durante o ciclo da cultura do milho de 340,7; 338,8; 256,6; 230,2; 192,7 e 185,5mm para os tratamentos com tensões de -30, -100, -300, -600, -900 e -1500 kPa, respectivamente. Neste trabalho encontrou um curva quadrática de resposta da cultura do milho à tensão da água no solo.

Em função das freqüentes secas ocorridas no Rio Grande do Sul, principalmente nos anos agrícolas 1987/88 e 1990/91, a adoção da irrigação tem sido apontada e recomendada como solução para estes problemas. Porém, a pesquisa não é tão categórica na recomendação desta tecnologia, para as nossas condições agroecológicas, apesar de reconhecer sua viabilidade técnica.

O presente estudo tem como objetivo geral desenvolver uma metodologia para a inclusão do risco na estimativa das necessidades de irrigação em zonas de clima subtropical, onde a irrigação reveste-se de um caráter suplementar e aleatório e, estimar, através de balanços hídricos diários, o risco envolvido no manejo da irrigação suplementar do milho nas condições agroecológicas do Planalto Médio e Missões.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo teve como abrangência as regiões agroecológicas das Missões e Planalto Médio do Estado do Rio Grande do Sul. Os valores médios de precipitação pluvial situam-se entre 1500 a 2000mm anuais. O clima predominante nas duas regiões, segundo a classificação climática de Köppen (1948), é Cfa.

A classe de solo predominante para a região agroecológica das Missões é o Latossolo Roxo distrófico textura argilosa (Unidade de Mapeamento Santo Ângelo). Para a região agroecológica do Planalto Médio predomina o Latossolo Vermelho Escuro distrófico e textura argilosa (Unidade de Mapeamento Passo Fundo), conforme Brasil (1973).

Os dados meteorológicos básicos utilizados neste estudo foram extraídos dos registros diários do 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura. Coletou-se, para cada uma das estações, os registros diários de uma série histórica de 10 anos consecutivos, correspondentes ao período de 1981 a 1990, inclusive.

As variáveis meteorológicas coletadas foram: precipitação pluvial, insolação, temperatura do ar, umidade relativa, evaporação e velocidade do vento a 2m.

Balanço hídrico

Através do cálculo do balanço hídrico diário realizado de acordo com o método proposto por Doorenbos e Kassan (1979), determinou-se a evapotranspiração potencial e necessidade de irrigação para as culturas de milho (*Zea mays* L.). Este modelo considera informações referentes ao clima, solo e cultura quais sejam:

Parâmetros climáticos – Foram utilizadas séries de dados disponíveis, para os postos meteorológicos de Cruz Alta como representativo da região das Missões e de Passo Fundo, como representativo do Planalto Médio.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada diariamente, utilizando-se o método de Penman (1948), com a simplificação do termo aerodinâmico (função do déficit de saturação do ar e velocidade do vento) proposta por Stanhill (1963), o qual foi substituído pela evaporação do evaporímetro de Piche, para os dados do posto agrometeorológico de Passo Fundo, conforme:

$$ET_o = \frac{\left(\frac{\Delta}{\gamma} \times \frac{Q}{59}\right) + (a + b + E_{pi})}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (1)$$

onde: ET_o = Evapotranspiração de referência (mm.dia^{-1}); Δ = tangente à curva de tensão de saturação de vapor da água à temperatura do ar ($\text{mm Hg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); γ = constante psicrométrica ($\text{mm Hg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); $Q \cdot 59^{-1}$ = saldo de radiação ($\text{mm de evaporação equivalente}$); $a = 0,23$; $b = 0,45$; E_{pi} = evaporação de Piche (mm.dia^{-1}).

Para os dados meteorológicos de Cruz Alta, o termo aerodinâmico da Equação (1), foi calculado pela expressão;

$$E_a = 0,35 \left(0,5 + \frac{W_2}{180} \right) (e_s - e_a) \quad (2)$$

onde: W_2 = velocidade do vento tomado a 2 m acima do solo (km.dia^{-1}).

Os valores de precipitação pluvial diária P_t foram alterados para considerar a lâmina efetiva de infiltração. Propõe-se usar o método de repartição sugerido pelo U.S. Soil Conservation Service (1975). Este método assume que a precipitação reparte-se em perdas iniciais, devido à interceptação e enchimento das rugosidades superficiais, no escoamento superficial e na infiltração. As perdas iniciais serão computadas pela fórmula:

$$P_{it} = \frac{5080}{NC} - 50,8 \quad (3)$$

O escoamento superficial é composto por:

$$P_{xt} = \frac{\left(P_t - \frac{5080}{NC} + 50,8\right)^2}{\left(P_t + \frac{20320}{NC} - 203,2\right)} \quad (4)$$

Como o método supõe que das perdas iniciais P_{it} 25% serão evaporadas e 75% infiltram-se, a chuva efetiva para recarregar o armazenamento no solo será:

$$P_{ef} = P_t - P_{xt} - 0,25 \times P_{it} \quad (5)$$

onde: P_t = é o total da precipitação pluvial durante o dia t (mm.dia^{-1}); P_{it} = é a perda

durante o dia t (mm.dia^{-1}); P_{xt} = chuva excedente durante o dia t , escoada superficialmente (mm.dia^{-1}); P_{et} = chuva efetiva durante dia t (mm.dia^{-1}); NC = é o "Número Curva", cujo valor varia entre 0 e 100, de acordo com o tipo de solo e cultivo, adimensional. Neste estudo adotou-se o valor de $NC = 82$.

Quando $P_t \leq P_{it}$, $P_{et} = 0,75 \times P_t$.

Parâmetros de solo - os valores de umidade à capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) foram obtidos das curvas características de retenção da água no solo, para os locais de interesse, nos trabalhos de Beltrame et al. (1979).

A capacidade de água disponível no solo, que representa a lâmina de água armazenada na camada radicular explorada pelas raízes, foi determinada através da relação:

$$CAD = \left(\frac{CC - PMP}{10} \right) \times h \quad (6)$$

onde: CAD = capacidade de água disponível no solo (mm); CC = umidade volumétrica do solo à capacidade de campo (%); PMP = umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente (%); h = profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

Assumiu-se que há variação da profundidade de exploração das raízes e, conseqüentemente, da CAD, desde um valor mínimo, na emergência, até um valor máximo na fase de florescimento das culturas. A função matemática que expressa esta relação é uma reta. As informações de profundidade do sistema radicular foram obtidas dos trabalhos de Doorenbos e Kassan, (1979) e Matzenauer, (1994), sendo de 60 cm para o milho.

Foi considerada como água disponível (AD), para ser usada na evapotranspiração, a fração p da CAD que pode ser utilizado pelas culturas antes de se configurar um déficit hídrico maior que o estabelecido para o nível de manejo, pela equação:

$$AD = p_i \times CAD \quad (7)$$

onde: p_i = fração de esgotamento admissível da água no solo para o nível de manejo da irrigação i .

A fração p_i da CAD foi usada para simular níveis de manejo da irrigação, representando um valor de tensão da água no solo, que possibilita uma percentagem do rendimento potencial da cultura em questão.

Tabela 1. Fração de esgotamento admissível da CAD, para o milho, nos solos Passo Fundo e Santo Ângelo.

Solo	Fração de esgotamento da capacidade de água disponível				
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
Passo Fundo	0,1136	0,2000	0,5000	0,6295	0,9545
Santo Ângelo	0,1235	0,1877	0,4691	0,5996	0,9259

Os níveis de manejo simulados através da fração p_i podem ser visualizados na Tabela 1, para cada cultura e ambiente.

Cada fração de esgotamento p_i representa um limite inferior de disponibilidade hídrica no solo que garante uma proporção da produtividade potencial da cultura, conforme adaptado de Hagan (1973); Millar (1984); Santos F^o et al. (1989) e Lamb (1991); e são:

- p_1 = 100% do rendimento potencial;
- p_2 = 90% do rendimento potencial;
- p_3 = 80% do rendimento potencial;
- p_4 = 70% do rendimento potencial;
- p_5 = 60% do rendimento potencial;

Parâmetros de cultura – No Planalto Médio e Missões do Rio Grande do Sul o milho é semeado no período de agosto a janeiro (FEPAGRO, 1996). Porém, em função do

cultivo do trigo de inverno, a semeadura começa de forma significativa a partir de outubro até meados de dezembro. Neste estudo fixou-se épocas de semeaduras quinzenais, entre 1° de setembro e 15 de dezembro, visando submeter a cultura aos períodos mais prováveis de déficit hídrico (Beltrame et al., 1979), fazendo coincidir déficits com subperíodos críticos das culturas.

A duração do ciclo da cultura, com vistas às necessidades de irrigação, considerou-se entre a emergência e maturação fisiológica, sendo 118 dias.

Os coeficientes de cultura (K_c) utilizados foram os recomendados por Doorenbos e Kassan (1979), para os principais estágios de desenvolvimento da cultura (Tabela 2).

Cálculo do balanço hídrico

Para realização dos cálculos diários do balanço hídrico escreveu-se um programa computacional em linguagem C++. Os dados de entrada foram os parâmetros de solo e cultura, época de semeadura, chuva efetiva (P_{et}) e evapotranspiração de referência (ET_0).

A evapotranspiração máxima (ET_m) foi calculada diariamente, a partir da expressão sugerida por Doorenbos e Kassan (1979), conforme:

$$ET_m = K_c \cdot ET_0 \quad (8)$$

onde: K_c = coeficiente de cultura.

O armazenamento da água no solo (ARM) era a lâmina definida pela capacidade de água disponível (CAD) e pelo limite inferior de disponibilidade (ARMCRI). Assim, quando o armazenamento de água no solo atingia o

Tabela 2. Coeficientes de cultura (K_c) para o milho (*Zea mays* L.).

Coeficiente de cultura	MILHO	
	Duração do período	K_c
K_{cI}	Emerg - 30 DAE	0,54
K_{cII}	30 DAE - 60 DAE	= 0,03 + 2,0079 · C ^(*)
K_{cIV}	60 DAE - 86 DAE	1,05
K_{cV}	86 DAE - maturação	= 1,776 - 0,9963 · C

DAE = dias após emergência; C = conforme Equação (12)

limite inferior de disponibilidade, simulava-se a irrigação de uma lâmina (H) suficiente para tornar o armazenamento igual a CAD. Desta forma, quantificou-se as lâminas de irrigação necessárias para cada local, época de semeadura, cultura e nível de manejo do limite inferior de disponibilidade hídrica.

O armazenamento crítico (ARMCRI) foi calculado, diariamente, utilizando-se a Equação (9).

$$\text{ARMCRI} = (1-p_i) \times \text{CAD} \quad (9)$$

A variação crescente da CAD desde a emergência até o começo do florescimento, foi expressa por uma relação linear, segundo a expressão:

$$\text{CAD} = a + b \cdot C \quad (10)$$

$$C = d \cdot D^{-1} \quad (11)$$

onde: a = CAD na emergência para cada solo; b = coeficiente angular da equação; d = período decorrido desde a emergência (dias); D = período entre a emergência e o florescimento (dias).

Admitiu-se uma relação linear entre tempo, CAD e o crescimento, em profundidade, das raízes até atingir o desenvolvimento vegetativo máximo. O armazenamento da água no solo (ARM) no primeiro dia do balanço foi:

$$\text{ARM} = \text{CAD} \quad (12)$$

Esta hipótese justifica-se devido à emergência das plantas, em condições de campo, ocorrer após uma chuva ou irrigação. Em seguida, os valores da CAD foram calculados diariamente, pela Equação (10), até a data do florescimento. Do florescimento ao final do ciclo considerou-se o armazenamento com valor máximo e constante.

Análise de risco

Os valores de lâmina de irrigação suplementar (H) estimados para cada limite

inferior de disponibilidade (p_i), época de semeadura, cultura e região testados, foram ajustados a uma distribuição de probabilidade teórica. No caso, foi testado o ajuste à distribuição normal, cuja função de densidade de probabilidade é:

$$F(H) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

onde: F(H) = função densidade de probabilidade da normal; H = lâmina de irrigação suplementar; μ = média de H; σ^2 = variância de H; σ = desvio padrão de H.

A verificação do ajustamento à distribuição normal foi realizada via "plotagem Q-Q", comparando-se os valores do coeficiente de correlação da normalidade de Filliben calculado com o coeficiente de correlação de FILLIBEN tabelado, para 1% de probabilidade.

Após o ajustamento à normal, da série (1981-1990) de lâmina de irrigação suplementar, obteve-se a lâmina de irrigação suplementar, com probabilidades de 98, 95, 90, 85, 80, 75, 70, 65 e 60% de ocorrência, para cada local, época de semeadura, cultura e nível de manejo da irrigação. A estimativa do nível de risco (da lâmina de irrigação suplementar ser superada) obteve-se através da subtração da probabilidade de ocorrência de 100.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ajustamento da lâmina de irrigação à distribuição normal

Verifica-se que houve ajustamento dos dados à distribuição normal, para as combinações de época-local-nível de manejo da umidade do solo.

Na cultura do milho, nas épocas de semeadura de setembro, há situações em que se tem dúvidas do ajustamento à normal, visto que o coeficiente de correlação de Filliben calculado é menor do que o valor crítico (tabelado) ao nível de significância de 1%. Conforme Oliveira (1990), os resultados de

lâmina de irrigação suplementar ajustaram-se à distribuição normal do nível de significância de 5%, através do teste Kolmogorov-Smirnov. Bernuth (1983) também obteve ajuste à distribuição normal para lâmina de irrigação suplementar total média.

O não ajustamento dos dados de algumas combinações entre época-local-nível de manejo da irrigação talvez possam ser atribuídos ao pequeno número de anos da série histórica de dados meteorológicos usados neste trabalho.

Apesar da dúvida do ajustamento em algumas combinações, estes valores de lâmina de irrigação suplementar média também foram usadas no tratamento estatístico como se tivesse havido o ajustamento à normal, porque a diferença entre o valor calculado e tabelado do coeficiente de correlação da normalidade foi pequena.

Análise probabilística da lâmina de irrigação suplementar

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os valores estimados da lâmina de irrigação suplementar (H, mm) requerida, correspondente aos níveis de 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 98% de probabilidades de não serem excedidas, para as combinações de local-época de semeadura-nível de manejo da irrigação. Estes valores da lâmina de irrigação suplementar, para cada nível de probabilidade, foram obtidos através do ajustamento à normal da série de dados gerados pelo modelo de balanço hídrico adotado. Os níveis de manejo da irrigação são traduzidos pelo (p_i) que representa a fração de extração da CAD admitida antes de voltar a irrigar, que garante uma percentagem da produtividade potencial da cultura (Tabela 1).

Verifica-se que os valores de lâmina de irrigação suplementar (H, mm) estimados sofrem um incremento a partir da época de semeadura em 1º de setembro até a semeadura em 15 de outubro, onde atingem valores máximos, voltando a declinar até a semeadura em 15 de dezembro, concordando com Silva (1976); Alfonsi et al. (1989); Oliveira

(1990), Matzenauer (1994); Cardoso (1995) e Fepagro (1996).

Numa análise das referidas tabelas, constata-se que para maiores níveis de probabilidade ou menores riscos, maiores são os valores da lâmina de irrigação requerida. Isto se explica pelo método de cálculo das probabilidades dos valores não serem excedidos, conforme utilizado nos trabalhos de Silva (1976), Mota e Agendes (1989), Mota (1989), Oliveira (1990) e Cardoso (1995). Este tipo de raciocínio e forma de apresentação é condizente com os projetos de irrigação, que são sempre dimensionados para valores máximos. Assim sendo, se por exemplo dimensionar-se o projeto de irrigação para 90% de probabilidade, isto quer dizer que o risco de falha é de 10%.

Se tomarmos, como exemplo, a Tabela 3 podemos verificar que a lâmina de irrigação suplementar requerida foi de 337,2mm para a cultura do milho semeado em 01 de setembro com nível de manejo p_1 , ou seja, rendimento esperado da cultura igual a 100% do seu potencial, ao nível de probabilidade de 90%. Este valor se interpreta da seguinte maneira: para cada 9 em 10 anos os valores da lâmina (H, mm) serão menores ou iguais a 337,2mm, sendo este valor superado apenas 1 vez a cada 10 anos, ou seja, risco de 10%. Para os demais níveis de probabilidade apresentados, a interpretação é semelhante.

Nas Tabelas 3 e 4 pode-se verificar que os valores da lâmina de irrigação suplementar determinados, para a cultura do milho, como exemplo, a 80% de probabilidade, estiveram entre 156,5 a 370,2mm e 98,2 a 291,7mm para a região agroecológica das Missões e Planalto Médio, respectivamente. Esta ampla variação é função da época de semeadura e nível de manejo da irrigação, porque quanto maior a coincidência entre período de máxima exigência hídrica da cultura e período de máxima demanda evaporativa do ambiente, maiores as necessidades de irrigação suplementar e vice-versa. O nível de manejo da irrigação também influi decisivamente na lâmina requerida, visto que quanto menor o nível de extração da CAD do solo, maiores são as necessidades de suplementação.

Tabela 3. Estimativa da lâmina de irrigação suplementar necessária (H, mm) com 60, 65, 75, 80, 85, 90, 95, 98% de probabilidade de ocorrência, para a cultura de milho na região agroecológica das Missões.

Época semeadura	Nível de manejo	Probabilidade de ocorrência								
		98%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%
01-Set	p ₁ *	375,4	355,2	337,2	325,1	315,5	307,2	299,8	292,9	286,4
	p ₂	367,4	345,5	326,0	312,9	302,4	293,4	285,4	278,0	270,9
	p ₃	334,4	306,4	281,6	264,9	251,6	240,2	229,9	220,4	211,4
	p ₄	314,3	285,5	259,9	242,6	228,8	217,0	206,5	196,7	187,4
	p ₅	221,2	199,9	181,0	168,3	158,2	149,5	141,7	134,4	127,6
15-Set	p ₁	401,7	381,8	364,2	352,3	342,8	334,7	327,4	320,6	314,2
	p ₂	398,6	375,6	355,2	341,5	330,5	321,1	312,7	304,9	297,4
	p ₃	372,4	341,7	314,3	295,8	281,2	268,6	257,3	246,8	236,9
	p ₄	360,4	330,3	303,5	285,5	271,1	258,8	247,8	237,6	227,8
	p ₅	325,1	293,7	265,8	247,0	232,0	219,2	207,7	197,0	186,9
01-Out	p ₁	422,3	400,4	380,9	367,8	357,3	348,3	340,3	332,9	325,8
	p ₂	409,3	388,0	369,0	256,2	346,0	337,3	329,5	322,2	315,3
	p ₃	374,3	348,5	325,6	310,2	297,9	287,4	277,9	269,2	260,9
	p ₄	369,2	344,1	321,8	306,7	294,8	284,5	275,3	266,8	258,7
	p ₅	322,8	298,3	276,4	261,7	250,0	239,9	230,9	222,6	214,6
15-Out	p ₁	437,4	414,7	394,6	381,0	370,2	361,0	352,7	345,0	337,6
	p ₂	419,9	396,3	375,4	361,3	350,1	340,4	331,8	323,8	316,2
	p ₃	359,3	337,0	317,1	303,7	293,0	283,9	275,7	268,1	260,9
	p ₄	376,3	347,5	321,9	304,7	290,9	279,2	268,6	258,8	249,5
	p ₅	326,3	301,8	280,1	265,4	253,7	243,7	234,7	226,4	218,5
01-Nov	p ₁	346,5	339,0	332,3	327,8	324,2	321,1	318,3	315,8	313,4
	p ₂	388,8	369,1	351,6	339,9	330,5	322,4	315,2	308,5	302,2
	p ₃	356,9	333,3	312,4	298,3	287,1	277,4	268,8	260,8	253,2
	p ₄	331,9	308,6	287,9	274,0	262,9	253,4	244,8	236,9	229,4
	p ₅	320,8	290,7	263,9	245,9	231,5	219,2	208,2	198,0	188,2
15-Nov	p ₁	395,6	376,3	359,2	347,6	338,4	330,5	323,5	316,9	310,7
	p ₂	364,7	347,3	331,9	321,5	313,3	306,2	299,8	293,9	288,3
	p ₃	324,5	306,0	289,5	278,4	269,5	261,9	255,1	248,8	242,8
	p ₄	292,9	274,7	258,5	247,5	238,8	231,4	224,7	218,5	212,6
	p ₅	291,5	269,4	249,7	236,4	225,8	216,8	208,6	201,1	193,9
01-Dez	p ₁	350,3	335,6	322,5	313,7	306,7	300,7	295,3	290,3	285,5
	p ₂	328,9	314,7	302,1	293,7	286,9	281,1	275,9	271,1	266,6
	p ₃	269,9	255,2	242,1	233,3	226,3	220,3	214,9	209,9	205,1
	p ₄	261,3	246,0	232,4	223,2	215,9	209,6	204,0	198,8	193,8
	p ₅	215,2	202,5	191,2	183,6	177,6	172,4	167,8	163,4	159,4
15-Dez	p ₁	313,7	299,5	286,9	278,5	271,7	265,9	260,7	255,9	251,4
	p ₂	285,8	273,3	262,2	254,7	248,7	243,6	239,0	234,8	230,8
	p ₃	241,1	225,3	211,2	201,7	194,2	187,7	181,9	176,5	171,4
	p ₄	228,9	213,1	199,0	189,5	182,0	175,5	169,7	164,3	159,2
	p ₅	211,6	193,0	176,5	165,4	156,5	148,9	142,1	135,7	129,7

* simula o nível de manejo da irrigação, ou seja, a fração de esgotamento da CAD admitida, estando relacionado com um nível de produtividade da cultura. Por exemplo: p₁ = 100%; p₂ = 90%; p₃ = 80%; p₄ = 70% e p₅ = 60% do potencial produtivo da cultura.

Tabela 4. Estimativa da lâmina de irrigação suplementar necessária (H, mm) com 60, 65, 75, 80, 85, 90, 95, 98% de probabilidade de ocorrência, para a cultura de milho na região agroecológica do Planalto Médio.

Época semeadura	Nível de manejo	Probabilidade de ocorrência								
		98%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%
01-Set	p ₁ *	290,6	275,6	262,2	253,2	246,1	240,0	234,4	229,3	224,5
	p ₂	265,9	249,7	235,4	225,6	217,9	211,3	205,4	199,9	194,6
	p ₃	235,6	212,6	192,2	178,4	167,4	158,0	149,5	141,7	134,3
	p ₄	234,5	209,5	187,4	172,4	160,5	150,3	141,2	132,7	124,7
	p ₅	190,5	165,5	143,3	128,3	116,4	106,2	97,0	88,5	80,5
15-Set	p ₁	311,7	296,8	283,6	274,6	267,5	261,4	256,0	250,9	246,1
	p ₂	281,5	265,8	252,0	242,6	235,1	228,8	223,0	217,7	212,7
	p ₃	244,8	224,2	205,9	193,5	183,7	175,3	167,7	160,7	154,1
	p ₄	254,0	226,8	202,7	186,4	173,5	162,4	152,4	143,2	134,4
	p ₅	213,9	186,4	161,9	145,4	132,2	121,0	110,8	101,5	92,6
01-Out	p ₁	328,8	313,4	299,7	290,5	283,1	276,8	271,2	265,9	260,9
	p ₂	319,3	300,8	284,4	273,3	264,5	257,0	250,2	243,9	237,9
	p ₃	271,2	247,7	226,9	212,8	201,6	192,0	183,4	175,4	167,8
	p ₄	235,7	217,3	201,0	189,9	181,2	173,6	166,9	160,6	154,7
	p ₅	219,0	195,9	175,4	161,6	150,5	141,1	132,6	124,8	117,3
15-Out	p ₁	334,8	320,3	307,3	298,6	291,7	285,7	280,4	275,4	270,7
	p ₂	329,1	310,6	294,2	283,1	274,2	266,7	259,9	253,6	247,6
	p ₃	279,2	255,6	234,7	220,6	209,4	199,7	191,1	183,1	175,5
	p ₄	290,6	262,9	238,3	221,7	208,5	197,1	187,0	177,5	168,6
	p ₅	277,7	243,3	212,6	192,0	175,5	161,5	148,8	137,1	126,0
01-Nov	p ₁	318,9	305,1	292,7	284,4	277,8	272,2	267,1	262,4	257,9
	p ₂	309,0	290,9	274,8	264,0	255,4	248,0	241,4	235,2	229,4
	p ₃	262,7	240,9	221,5	208,4	198,1	189,1	181,2	173,7	166,7
	p ₄	243,5	221,2	201,3	187,9	177,2	168,1	159,9	152,3	145,1
	p ₅	251,9	222,2	195,8	178,0	163,9	151,8	140,9	130,8	121,2
15-Nov	p ₁	309,2	296,8	285,8	278,4	272,5	267,4	262,9	258,7	254,7
	p ₂	308,0	290,0	274,1	263,3	254,7	247,4	240,8	234,7	228,9
	p ₃	252,1	233,6	217,1	206,0	197,1	189,5	182,7	176,4	170,4
	p ₄	239,5	218,3	199,6	186,9	176,8	168,2	160,4	153,2	146,4
	p ₅	181,2	163,8	148,4	138,0	129,8	122,7	116,3	110,4	104,8
01-Dez	p ₁	295,0	282,1	270,6	262,9	256,7	251,4	246,7	242,3	238,1
	p ₂	281,9	265,9	251,6	242,0	234,4	227,8	222,0	216,5	211,3
	p ₃	241,2	220,4	201,9	189,4	179,4	170,9	163,2	156,2	149,4
	p ₄	202,5	184,9	169,2	158,6	150,2	142,9	136,5	130,4	124,7
	p ₅	212,9	188,5	166,7	152,1	140,4	130,4	121,5	113,1	105,2
15-Dez	p ₁	271,5	258,4	246,7	238,9	232,6	227,2	222,4	218,0	213,7
	p ₂	260,8	245,0	231,0	221,5	214,0	207,5	201,7	196,4	191,3
	p ₃	195,7	180,2	166,3	157,0	149,6	143,2	137,5	132,2	127,2
	p ₄	185,4	169,1	154,6	144,9	137,1	130,4	124,4	118,9	113,6
	p ₅	155,9	136,4	119,1	107,4	98,2	90,2	83,1	76,4	70,2

*simula o nível de manejo da irrigação, ou seja, a fração de esgotamento da CAD admitida, estando relacionado com um nível de produtividade da cultura. Por exemplo: p₁ = 100%; p₂ = 90%; p₃ = 80%; p₄ = 70% e p₅ = 60% do potencial produtivo da cultura.

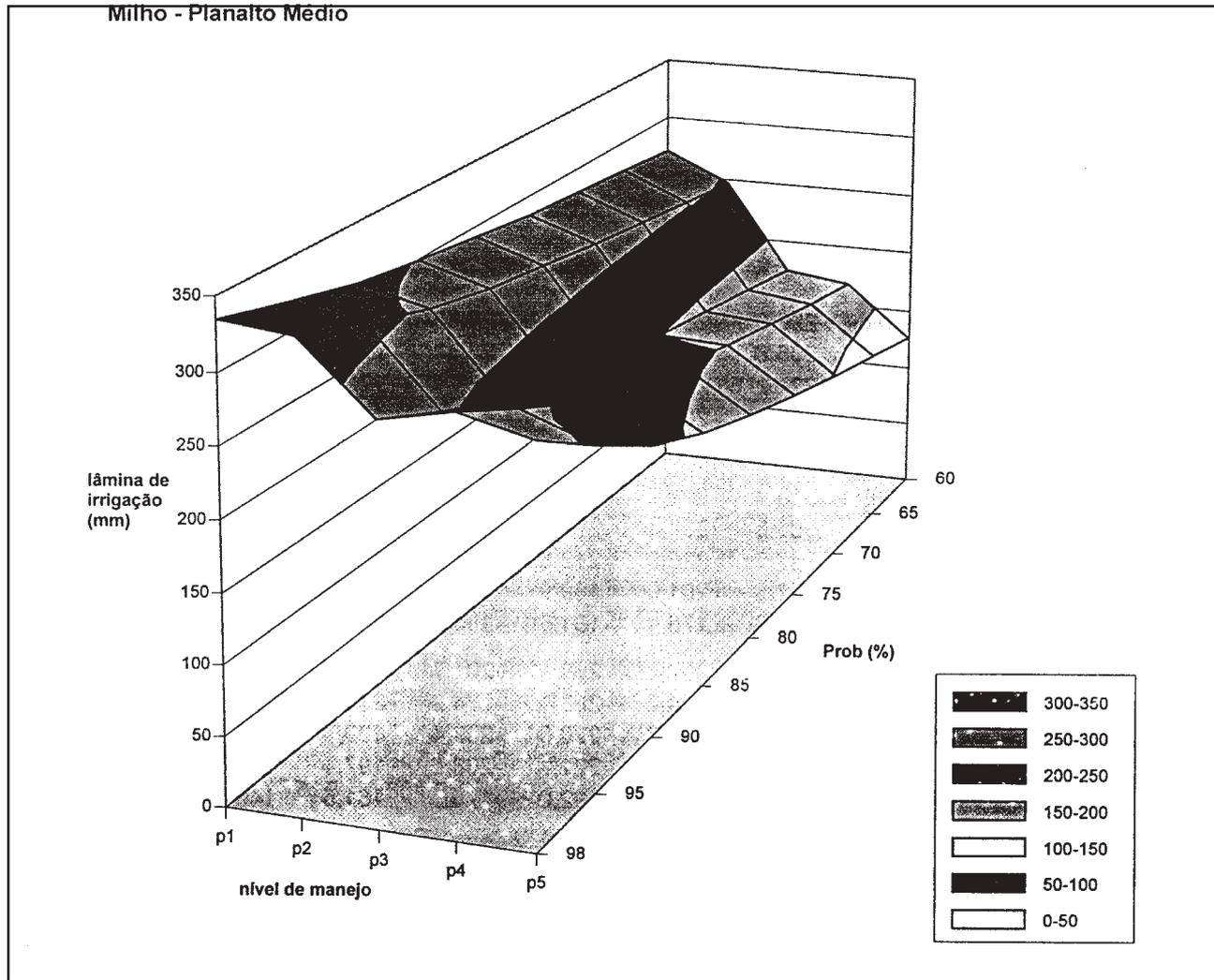


Figura 1. Lâmina de irrigação suplementar (H, mm) requerida para a combinação entre nível de manejo da irrigação e probabilidade de ocorrência, para a cultura do milho semeado em 15 de outubro, na condição agroecológica do Planalto Médio.

A maior necessidade de irrigação na região das Missões é devido à maior demanda evaporativa dessa região em relação ao Planalto Médio.

Tomando-se como exemplo a época de semeadura 15 de outubro, que apresentou as maiores necessidades de irrigação, conforme as Tabelas 3 e 4, pode-se visualizar na Figura 1 o comportamento da lâmina de irrigação suplementar requerida, para as diversas combinações de manejo da irrigação e níveis de probabilidade. Observa-se as linhas ou curvas de mesma necessidade de irrigação e que o incremento das curvas, ou seja, o gradiente entre as curvas é maior nos baixos

níveis de risco quando comparado com altos níveis de risco para os diversos níveis de manejo da irrigação estudados.

Os resultados encontrados neste estudo concordam com os resultados de Mota (1971), Buriol et al. (1977) e Beltrame et al. (1979), que afirmam que existem deficiências hídricas nos meses de primavera-verão (out.-mar.). Concordam também com Mota (1980) no tocante a probabilidade de ocorrência e magnitude da lâmina de irrigação suplementar requerida para as condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões. Os valores por ele encontrados são pouco superiores aos deste trabalho, visto que o período de

análise do balanço hídrico usado pelo referido autor foi bem mais abrangente (seis meses) e, também, usou uma profundidade para armazenamento muito grande. Quando se compara os resultados com os encontrados por Mota e Agendes (1989), num estudo das necessidades de irrigação por aspersão para o Planalto Médio e Missões ao nível de 80% de probabilidade, com os deste trabalho, verifica-se uma grande concordância. Porém, em função da magnitude das lâminas de irrigação encontradas neste estudo, pode-se dizer que o estudo de Beltrame et al. (1979) não reproduz a realidade físico-hídrica do solo ao recomendar ser dispensável a irrigação suplementar nas condições agroecológicas do Planalto Médio.

Autores como Oliveira (1986) e FEPAGRO (1996), que recomendam irrigar apenas no período crítico ou em algumas épocas do ciclo, realmente conseguem reduzir o volume de irrigação, mas não se dão conta de dois aspectos importantes. Primeiro: a amortização do equipamento deve ser realizada independente da irrigação ser feita ou não; segundo: podem ocorrer déficits hídricos tão pronunciados, mesmo fora do período crítico, que comprometem de forma irreversível a produtividade. Assim, verifica-se a importância do estudo da análise dos benefícios contra os custos nas diversas possibilidades de manejo.

Porém, as necessidades de suplementação da irrigação variam de um valor mínimo para o risco de 40% até um valor máximo para o risco de falha de 2%, conforme Tabela 3 e 4. Então, quando houver uma falha, a máxima lâmina de irrigação suplementar requerida será aquela referente ao risco de 2%, para um dado nível de manejo da irrigação. Se o sistema de irrigação suportar um aumento da demanda da lâmina de irrigação, pode-se evitar a redução da produtividade, ocorrendo apenas redução nos resultados econômicos esperados.

A análise probabilística das variações entre épocas, verificada para lâminas de irrigação, permite a escolha de épocas com menores necessidades de água, o que pode ser interessante para situações onde há escassez de água, porém, prescinde de um

estudo de otimização econômica para escolher o adequado nível de manejo da água com vistas à maximização dos retornos do investidor privado. Quando a análise for sob o ponto de vista social, a otimização econômica também deve ser perseguida, porém, deve-se otimizar o uso do bem comum, que no caso, é a água.

Apesar das necessidades de irrigação detectadas neste estudo, é importante ter em vista que a recomendação da irrigação e o nível de manejo desta, somente deverá ser feita após estudos da viabilidade econômica e financeira das diversas combinações de manejo-local-época de semeadura-probabilidade das necessidades de irrigação suplementar, como também sugerem Silva (1976), Oliveira (1990) e Dorfman (1992).

CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos em função da metodologia empregada e na base de dados agrometeorológicos, conclui-se que:

- i. as necessidades de irrigação suplementar são máximas para a semeadura em 15 de outubro, declinando para as semeaduras realizadas antes e após esta data, sendo os menores valores encontrados na semeadura de 15 de dezembro;
- ii. as necessidades de irrigação suplementar são maiores nas condições agroecológicas das Missões quando comparadas com as do Planalto Médio;
- iii. as estimativas da lâmina de irrigação suplementar ajustam-se à distribuição normal, ao nível de significância de 1%;
- iv. as lâminas de irrigação suplementar estimadas aumentam à medida que o nível de risco diminui.

REFERÊNCIA

ALFONSI, R.R.; CAMARGO, M.B.P. de; CHIAVERATTO, O.M.D.P.; PEDRO Jr., M.J.; ORTOLANI, A.A.; BRUNINI, O. (1989). Níveis de probabilidade de seca, como subsídio à

- irrigação no estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6., Maceió, 1989. *Anais...*Maceió: INPE/SBA/UFAL. P.34-38.
- BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.; CAUDURO, F. (1979). *Probabilidade de ocorrência de déficits e excessos hídricos em solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 79f.
- BERLATO, M.A. (1992). As estiagens e seus impactos na produção agrícola do estado do Rio Grande do Sul. In: MARCANTÔNIO, G. *Solos e irrigação*. Porto Alegre: Ed. UFRGS/FEDERACITE. P.92-94.
- BERNUTH, R.D. (1983). Uniformity design criteria under limited water. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.26, n.5, p.1418-1421.
- BRASIL. (1973). *Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul*. Recife: Ministério da Agricultura. 431p. (Boletim técnico, nº 30).
- BURIOL, G.A. et al. (1977). *Balanco hídrico seriado do Rio Grande do Sul*. Santa Maria: UFSM. 216p.
- BURIOL, G.A. et al. (1979). Distribuição geográfica das disponibilidades hídricas do solo possíveis de ocorrerem no Estado do Rio Grande do Sul. *Rev. Centro de Ciências Rurais*, Santa Maria, v.9, n.2, p.111-169.
- CARDOSO, C.O. (1995). *Avaliação da demanda hídrica de algumas culturas sujeitas à alteração climáticas na bacia do Rio Uruguai*. Porto Alegre: IPH/UFRGS. Curso de Pós-Graduação em Engenharia dos Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 174f. Dissertação (Mestr. Engenharia Civil).
- DOORENBOS, J., KASSAN, A.H. (1979). *Yield response to water*. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations. 235p. (Irrigation and Drainage paper, 33).
- DORFMAN, R. (1992). Irrigar ou não: eis a questão! In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 9., Natal, 1991. *Anais...* Fortaleza: ABID. v.2, p.1791-1812.
- FEPAGRO. Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária. (1996). *Recomendações técnicas para a cultura do milho no RS*. Porto Alegre: FEPAGRO/FECOTRIGO. 121p. (Programa Multiinstitucional de Difusão de Tecnologia do Milho).
- HAGAN R.M. (1973). Water plant growth and crop irrigation requeriments. In: *Irrigation, drainage and salinity*. Paris: FAO/UNESCO. p.206-253.
- JENSEN, M.E. (1973). *Consumptive use of water and irrigation water requeriments*. New York: ASCE. 215p.
- LAMB, P.R. (1991). *Desenvolvimento e componentes do rendimento do milho irrigado a diferentes níveis de potencial de água no solo*. Santa Maria: UFSM. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. 84 f. Dissertação (Mestr. Engenharia Agrícola).
- MATZENAUER, R. (1980). *Evapotranspiração do milho (Zea mays, L.) e suas relações com fórmulas e parâmetros meteorológicos*. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia/UFRGS. Curso de Pós-Graduação em Agronomia. 128f. Dissertação (Mestr. Fitotecnia).
- MATZENAUER, R. (1994). *Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento do milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia/UFRGS. Curso de Pós-Graduação em Agronomia. 172f. Tese (Doutorado em Agrometeorologia).
- MILLAR, A.A. (1984). *Manejo racional da irrigação: uso de informações básicas sobre diferentes culturas*. Brasília: IICA. 75p.
- MOTA, F.S. da; BEIRSDORF, M.I.C.; GARCEZ, J.R.B. (1971). *Zoneamento agroclimático do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. Pelotas: IPEAS. 122p.(Circular Técnica, nº50).
- MOTA, F.S. da. (1980). *Probabilidades das necessidades de irrigação em vinte combinações do binômio clima-solo no Rio Grande do Sul*. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas. 86p. (Boletim Técnico, nº2)
- MOTA, F.S. da. (1989). Informação climática para planejamento das pastagens na fronteira sul e litoral do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6., Maceió, 1989. *Anais...* Maceió: SBA. p.089-095.
- MOTA, F.S.da; AGENDES, M.O. DE O. (1989). Informação climática para planejamento da irrigação da soja no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6., Maceió, 1989. *Anais...* Maceió: SBA. p.348-354.
- OLIVEIRA, D. (1990). *Evapotranspiração máxima e necessidade de água para irrigação de feijão (Phaseolus vulgaris L.) e trigo (Triticum aestivum L.) determinado por balanço hídrico para seis locais do Paraná*. Piracicaba: USP/ESALQ. 155f. Dissertação (Mestr. Agrometeorologia).
- OLIVEIRA, J.L.B. (1986). *Resposta do milho (Zea mays, L.) à irrigação suplementar por sulcos*. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS. Curso de Pós-Graduação

- em Engenharia dos Recursos Hídricos. 70f. Dissertação (Mestr. Engenharia Civil).
- PENMAN, HL. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London Ser.*, n.3, p.20-145.
- SANTOS Fº, B.G.; SANTOS, D.S.B.; GOMES, A.S.; PAULETTO, E.A.; MESQUITA, J.A.; SCHUCH, L.A.B. (1989). Comportamento estomático y rendimiento de cinco genótipos de soja sometidos a diferentes niveles de humedad en el suelo. In: CONFERÊNCIA MUNDIAL DE INVESTIGACION EM SOJA, 4., Buenos Aires, Argentina, 1989. *Actas...* Buenos Aires: Asociación Argentina de la Soja. p.383-90.
- SILVA, A.T. da. (1976). *Estudo freqüencial das necessidades de irrigação em quatro localidades do estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: IPH/UFRGS. Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada. 92f. Dissertação (Mestr. Engenharia Civil).
- SOIL CONSERVATION SERVICE. (1975). *Hydrology guide for use in watershed planning*. Washington: Dept. of Agriculture.
- STANHILL, G. (1962). *The use of Piche evaporimeter in the calculation of evaporation*. Q. J. R. Meteorol. Soc., n.28, p.80-82.

Probabilistic Analysis of Supplemental Irrigation Demands in Rio Grande do Sul

ABSTRACT

This research study was performed to estimate the stochastic supplementary needs of sprinkler irrigation to be used on maize (Zea mayz L.) crop, in the agrieological regions of the State of Rio Grande do Sul, called Planalto Médio and Missões. A series of 10 years of daily meteorological data from the meteorological stations of Cruz Alta and Passo Fundo was used to simulate irrigation needs using a water balance model. The needs were simulated for the combination of diferent sites (agrieological region of Missões and Planalto Médio); sowing seasons (Sep 1, Sep 15, Oct 1, Oct 15, Nov 1, Nov 15, Dec 1, Dec 15); irrigation management levels (for 100, 90, 80, 70 and 60 % of the potential crop yields) and levels of risk (2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40%). The results indicate that: the needs for supplementary irrigation are at their highest when sowing is performed on October 15, diminishes for sowing before and after this data, the lowest values being found for December 15; the supplementary irrigation requeriments are greater under the agrieological conditions of the Missões as compared with those of the Planalto Médio; the supplementary amounts of irrigation estimated increase as the level of risk diminishes.