

ADRIANE REGINA BORTOLOZZO

**DISPONIBILIDADE DINÂMICA DE ÁGUA À
CULTURA DO FEIJOEIRO**

Dissertação apresentada como requisito
parcial à obtenção do grau de Mestre.
Curso de Pós-Graduação em Agronomia
Setor de Ciências Agrárias,
Universidade Federal do Paraná.
Orientador: Prof. Dr. C. L. Prevedello

CURITIBA
1995

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO
"MESTRADO"**

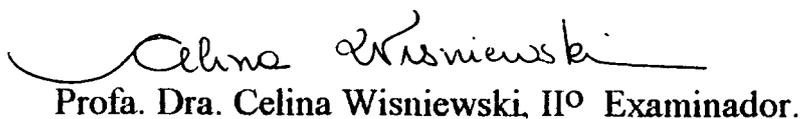
P A R E C E R

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pela candidata **ADRIANE REGINA BORTOLOZZO**, com o título: **"Disponibilidade dinâmica de água à cultura do feijoeiro"** para obtenção do grau de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haver analisado o referido trabalho e argüido a candidata, são de Parecer pela **"APROVAÇÃO"** da Dissertação com o conceito "A" completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo"**.

Secretaria do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", em Curitiba 28 de novembro de 1995.


Prof. Dr. Celso Luiz Prevedello, Presidente.


Prof. Dr. Marcos Luiz de Paula Souza, Iº Examinador.


Profa. Dra. Celina Wisniewski, IIº Examinador.

Quando a gente vê sempre as mesmas pessoas terminamos fazendo com que elas passem a fazer parte de nossas vidas. E como elas fazem parte de nossas vidas, passam também a querer modificar nossas vidas. Se a gente não for como elas esperam, ficam chateadas. Porque todas as pessoas tem a noção exata de como devemos viver nossa vida. E nunca têm noção de como devem viver as suas próprias vidas.

PAULO COELHO

Aos meus pais Pedro e Lourdes por
todo o sacrifício realizado para a e-
ducação e formação dos filhos;

Aos meus irmãos: Ana Cláudia e
Paulo Roberto, por toda amizade,
amor e carinho compartilhados até
hoje...

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao professor Celso Luiz Prevedello, pela valiosa orientação, auxílio e amizade.

Ao professor Glaucio Roloff pela amizade, pelo auxílio e incentivo.

Ao professor Carlos Bruno Reissmann pela amizade e pelo empréstimo de material.

À Universidade Federal do Paraná, em especial ao Departamento de Solos, pela oportunidade concedida para a realização do curso.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Aos funcionários do Departamento de Solos, em especial ao Gerson, ao Ugo, à D. Elda, à Valdina e ao Rui; e aos funcionários da Biblioteca do Setor de Ciências Agrárias em especial à Liliana, Helena e ao Agrinaldo pela colaboração e amizade.

À amiga Sandra Mara Vieira, por todo apoio e pelos bons momentos vividos na nossa grande amizade.

Aos colegas de curso, em especial: Ariodari, Sérgio, Volnei, Luís, Maria Izabel pelo apoio e amizade.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 CLIMA.....	4
2.2 MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO.....	5
2.3 PRÁTICAS CULTURAIS.....	6
2.3.1 FERTILIZANTES.....	6
2.3.2 POPULAÇÃO DE PLANTAS.....	6
2.4 ÁGUA DO SOLO.....	7
2.5 DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO.....	11
2.6 A FRAÇÃO p DE ÁGUA DISPONÍVEL.....	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 SOLO.....	18
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	19
3.2.1 PREPARO DO SOLO E INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	19
3.2.2 TOMADA DE DADOS.....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 DETERMINAÇÃO DO PONTO CRÍTICO (PONTO DE PERDA DE TURGOR).....	24

4.2	RELAÇÃO ENTRE A $E_{Tmáx.}$ E AS EVAPO - RAÇÕES DIÁRIAS.....	28
4.3	EFEITOS DO “STRESS” HÍDRICO NA PRO- DUÇÃO DE MATÉRIA SECA.....	30
4.4	TAXA DE CRESCIMENTO EM RELAÇÃO À EVAPOTRANSPIRAÇÃO OU TRANSPIRAÇÃO.....	33
4.5	VALORES DE p ENCONTRADOS EM COM- PARAÇÃO COM OS FORNECIDOS POR DOORENBOS & PRUITT (1984).....	38
5	CONCLUSÕES.....	43
	ANEXOS.....	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

LISTA DE TABELAS

1-VALORES DE p EM FUNÇÃO DA $ET_{máx}$. PARA A CULTURA DO FEIJÃO, SEGUNDO DOORENBOS & PRUITT (1984).....	17
---	----

LISTA DE QUADROS

1-ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO.....	18
2-FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO.....	18

LISTA DE FIGURAS

1-ESQUEMA DO ARRANJO EXPERIMENTAL.....	20
2-PERDA DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO SOLO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO. A CURVA DO DIA 18/12 REFERE-SE SOMENTE À TRANSPIRAÇÃO. AS SETAS INDICAM O VALOR DA UMIDADE ONDE INICIA O PONTO DE PERDA DE TURGOR DA CULTURA.....	24
3-RELAÇÃO ENTRE A TAXA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA À CAPACIDADE DE CAMPO ($ET_{máx}$) E A EVAPORAÇÃO ESTIMADA PELO EVAPORÍMETRO PICHÉ. OS NÚMEROS AO LADO DOS PONTOS INDICAM OS DIAS DO MÊS DE DEZEMBRO/93, AGRUPADOS EM 3 PERÍODOS.....	28
4-PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA, DA PARTE AÉREA DO FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DO TEMPO, SUJEITAS ÀS VÁRIAS CONDIÇÕES DE “STRESS” HÍDRICO: 20%; 35 % 50%; 65%; 80%, 90% E 100% DA CAPACIDADE DE CAMPO.....	30
5-RELAÇÃO DA TAXA DE CRESCIMENTO DA MATÉRIA SECA DA PARTE AÉREA DO FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DA TAXA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO OU TRANSPIRAÇÃO, CONFORME O CASO.....	33
6-FRAÇÃO p DE ÁGUA DISPONÍVEL EM FUNÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO MÁXIMA PARA A CULTURA DO FEIJÃO.....	39

RESUMO

Entre os fatores que afetam a evapotranspiração de uma cultura, a disponibilidade de água do solo (p) é um dos fatores mais importantes. Observações feitas em experimentos conduzidos por diversos autores, prevêm uma redução na fração p de água disponível a medida que a taxa de evapotranspiração potencial aumenta. Conhecer a amplitude dessas frações, em função das diferentes demandas evapotranspirativas, é crucial no estabelecimento de um controle adequado das irrigações, a fim de responder o binômio quando e quanto irrigar para a maximização das culturas agrícolas e eficiência no uso de insumos. Para a execução do experimento foram utilizados aproximadamente 150 kg de TFSA. O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. A cultura utilizada foi o feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.), cultivar Tibagi. Os resultados encontrados permitiram as seguintes conclusões: (i) a umidade crítica do solo, correspondente ao ponto de perda de turgor das células das plantas, abaixo da qual a cultura de feijão não evapotranspira idealmente, é variável e determinada pelas condições edafoclimáticas; (ii) a relação entre a Evapotranspiração máxima (Etmáx.) com os dados de evaporação obtidos pelo evaporímetro Piché, foi linear e crescente com o desenvolvimento da cultura do feijão, até o início da frutificação, quando o experimento foi interrompido; (iii) qualquer redução no teor de água do solo abaixo da fração p de água disponível, tem como resultado uma diminuição linear na taxa de crescimento da cultura abaixo de seu potencial máximo; (iv) a fração p de água disponível em função da Etmáx. obtida neste trabalho diferiu daquela proposta pela DOORENBOS & PRUITT(1984). As propriedades hidráulicas do solo podem ter sido a principal causa dessas diferenças, mas que, contudo, não inviabilizam a recomendação dessa fração sugerida pelos autores para a cultura do feijão.

ABSTRACT

The p fraction of available water is very important among factors that affect the evapotranspiration of a culture. Various researchers, with experiments observations, predicted that value of p would decrease when the potential evapotranspiration rate increased. The objective of this study was to evaluate the amplitude of p as the function of the evapotranspiration demand to find an important relation in the establishment of an adequate control of irrigation which gives information about when and how much to irrigate for a maximum of agricultural production and efficiency water use. The experiment was carried out in the green-house, Agrarian Sciences Sector, Federal University of Paraná, using bean (*Phaseolus vulgaris*, L.) cultivar Tibagi. The obtained results permit the following conclusions: (i) the critical water content, which corresponds to the wilting point and below that the culture does not ideally evapotranspire, is variable and determined by the edaphoclimatic conditions; (ii) the relation between the maximum evapotranspiration ($E_{m\acute{a}x.}$) and evaporation obtained with the Piche evaporimeter was linear and increased with the culture growth, until the beginning of the frutification when the experiment was stopped; (iii) any reduction of the water content below the fraction p has a linear decrease of the culture growth rate below its maximum potential; (iv) the fraction p obtained by this study was different with that proposed by DOORENBOS & PRUITT (1984). The soil hydraulic properties could be the principal cause of this difference however the value of p proposed by them can be recommended for the bean culture.

1 INTRODUÇÃO

A evaporação da água do solo, juntamente com a transpiração pelas plantas, constituem o que é denominado de evapotranspiração, e representa o retorno da água do solo para a atmosfera. Da interação entre a precipitação, a evapotranspiração e a drenagem profunda, resulta a quantidade de água de um solo que pode ser utilizada pelas plantas. Quando a evapotranspiração se processa livremente e o solo não tem deficiência de água, o fenômeno denomina-se evapotranspiração potencial ou máxima. Quando há deficiência de água no solo, a evapotranspiração fica reduzida à quantidade de água que a vegetação consegue retirar do solo; nesse caso, recebe a denominação de evapotranspiração real (ou efetiva).

Ênfase tem sido dada à disponibilidade de água às plantas. Entre os fatores que afetam a evapotranspiração de uma cultura, a disponibilidade de água do solo é um dos mais importantes. A medida que o solo seca, a condutividade hidráulica não saturada decresce. A contínua diminuição no valor da condutividade hidráulica tem como consequência uma redução na densidade de fluxo de água necessário às plantas, com sérios prejuízos ao desenvolvimento delas.

Quando se pretende conhecer a disponibilidade de água para uma cultura, geralmente leva-se em consideração apenas as precipitações totais. Esses dados, porém, não são suficientes, sendo necessário considerar como ocorre o consumo dessa água e também suas perdas por evapotranspiração.

Muita atenção tem sido dada para a questão de como prever o uso de água para as culturas, sob condições onde a água do solo não é fator limitante. Para culturas em pleno desenvolvimento, costuma-se dizer que o consumo ideal é a máxima taxa de evapotranspiração (evapotranspiração potencial). Essa taxa potencial é relativa a um intervalo de umidade do solo, dentro do qual as plantas não sofrem restrição hídrica. Esse intervalo, por sua vez, define o que se convencionou chamar de fração p de água disponível.

Observações feitas em experimentos conduzidos por diversos autores, prevêm uma redução na fração p de água disponível, a medida que a taxa de evapotranspiração potencial aumenta.

Conhecer a amplitude de variações dessas frações, em função das diferentes demandas evapotranspirativas, é crucial no estabelecimento de um controle adequado das irrigações, a fim de responder o binômio *quando* e *quanto* irrigar para a maximização das culturas agrícolas e eficiência no uso de insumos.

A partir de um experimento conduzido em casa de vegetação, tendo por cultura o feijão, que representa a principal fonte de proteína das populações de baixa renda e constitui um produto de destacada importância nutricional, econômica e social, o presente trabalho teve por objetivos:

- i) Determinar o ponto crítico de umidade do solo, abaixo do qual a taxa de evapotranspiração atual da cultura reduz do seu valor máximo (potencial);

- ii) Observar a relação entre a Evapotranspiração máxima ($ET_{m\acute{a}x.}$) com os dados da evaporação obtidos pelo evaporímetro Piché ao longo do experimento;
- iii) Verificar a redução da matéria seca das plantas, sujeitas às várias condições de “stress” hídrico;
- iv) Estabelecer os valores de p em função da $ET_{m\acute{a}x.}$ e compará-los com os dados fornecidos por DOORENBOS & PRUITT (1984).

2 REVISÃO DA LITERATURA

O conhecimento do consumo de água nos diversos subperíodos ou etapas de desenvolvimento das plantas cultivadas, permite a administração de uma irrigação mais racional e efetiva, de acordo com a exigência da cultura (BERLATO & MOLION, 1981).

Quando a evapotranspiração se processa livremente, em área extensa, coberta de vegetação e o solo não tem deficiência de água, o fenômeno denomina-se evapotranspiração potencial ou normal. Quando há deficiência de água no solo, a evapotranspiração fica reduzida à quantidade de água que a vegetação consegue retirar do solo; nesse caso recebe a denominação de evapotranspiração real ou efetiva (CAMARGO, 1960).

A evapotranspiração pode ser afetada por vários fatores. O clima é o fator mais importante que afeta as perdas de água de uma cultura; as condições de solo, doenças, pragas, a própria cultura e suas características de crescimento, além de práticas agrícolas como métodos de irrigação e as práticas culturais, também influenciam a transferência de água para a atmosfera (DOORENBOS & PRUITT, 1984; KLAR, 1984).

2.1 CLIMA:

É comum usar-se dados climáticos para estimar a evapotranspiração vegetal. Contudo, devido às mudanças no tempo, tanto a evaporação como a transpiração (ou ambas) podem variar de ano para ano e para cada período dentro do mesmo.

Segundo DOORENBOS & PRUITT (1984) de ano para ano, os valores mensais apresentam grandes variações. As evapotranspirações mensais podem variar de um ano para o outro perto de 50 %, ou mais.

Os valores diários podem variar drasticamente, com baixos valores em dias que houver chuva, estiver nublado e úmido, e elevados valores em dias secos, ensolarados ou com muito vento.

DENMEAD & SHAW (1962), por exemplo, observaram taxas de transpiração em cultura de milho que variaram de 1,4 mm/d em dias nublados, até 6,4 mm/d em dias ensolarados.

2.2 MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO:

A evapotranspiração é pouco afetada pela irrigação, se os sistemas forem projetados, instalados e operados apropriadamente.

Os diferentes métodos implicam em diferentes taxas de aplicação de água. Quando comparados em termos de eficiência de demanda de água, encontram-se algumas diferenças; a aparente superioridade de um método sobre o outro, pode ser um mero resultado de mais ou menos água aplicada. Pode não ser falha do método de irrigação, e sim, do manejo deste (DOORENBOS & PRUITT, 1984).

2.3 PRÁTICAS CULTURAIS:

2.3.1 FERTILIZANTES:

O uso de fertilizantes tem um leve efeito sobre a evapotranspiração, a menos que o crescimento vegetal tenha sido afetado pela baixa nutrição do solo, atrasando a cobertura vegetal (DOORENBOS & PRUITT, 1984).

2.3.2 POPULAÇÃO DE PLANTAS:

O efeito da população de plantas ou a densidade de plantas na evapotranspiração, é similar àquela da cobertura do solo. Quando a superfície do solo se mantém relativamente seca, a evaporação desta é abruptamente reduzida e a evapotranspiração será menor para baixas populações do que para elevadas populações vegetais. Durante os estágios iniciais da cultura, uma elevada população, pode, normalmente, requerer mais água do que uma baixa população, devido ao rápido desenvolvimento da cobertura do solo. A presença de vegetação produz sombreamento no solo, diminuindo a temperatura, a incidência de ventos, podendo aumentar a umidade relativa do ar próxima do solo.

Nas irrigações, a população de plantas tem sido considerada de pequena importância, em termos de necessidade total de água (DOORENBOS & PRUITT, 1984; KLAR, 1984).

2.4 ÁGUA DO SOLO:

Após uma chuva ou irrigação, a água do solo será reduzida primariamente pela evapotranspiração.

Em solos secos, a taxa de água transmitida através do solo reduzirá. Quando, em algum estágio, a taxa de fluxo cai abaixo da taxa necessária para suprir a evapotranspiração, esta cairá abaixo do nível previsto.

O efeito da evapotranspiração na água contida no solo varia de acordo com a cultura e é condicionada primariamente pelas propriedades hidráulicas do solo, pelas características radiculares da cultura e por fatores meteorológicos. Sob moderadas demandas evaporativas, a evapotranspiração não excede 5 mm/d; para a maioria das culturas a evapotranspiração é igual por ser pouco afetada pela tensão da água do solo acima de uma atmosfera (correspondendo aproximadamente a 30% do volume disponível da água do solo, 40% para solo franco, 50% para franco arenoso e 60% para areno francoso). Quando as demandas evaporativas são baixas, a cultura pode transpirar e prever a taxa de evapotranspiração, mesmo que a depleção da água disponível seja maior; quando as demandas evaporativas são altas, a evapotranspiração da cultura será reduzida se a taxa de água que supre as raízes for incapaz de cobrir as perdas por transpiração. Isto será mais pronunciado em solos de textura pesada do que em leve (DOORENBOS & PRUITT, 1984; KLAR, 1984). Reduções na evapotranspiração afetam o crescimento e/ou a produção da cultura; cadência e magnitude da redução na evapotranspiração da cultura são critérios importantes para práticas de irrigação.

Para a maioria das culturas, o crescimento, e conseqüentemente, a $ET_{m\acute{a}x.}$, serão afetados quando o solo for raso ou estiver encharcado.

A evapotranspiração também pode ser afetada pela salinidade do solo, uma vez que a água do solo absorvida pela planta pode ser reduzida drasticamente devido ao elevado potencial osmótico dos solos salinos (DOORENBOS & PRUITT, 1984).

Muitos resultados experimentais têm mostrado que, seguida da infiltração, ocorrem muitas mudanças no conteúdo de água do solo, diminuindo rapidamente com o tempo. Quando essas mudanças se tornam mínimas, significa que a taxa de drenagem interna é negligivelmente pequena, o que geralmente acontece em poucos dias. O conteúdo de água em que a drenagem interna supostamente pára, foi denominado capacidade de campo (DOORENBOS & PRUITT, 1984; WINTER, 1984; VEIHMEYER & HENDRICKSON, 1949).

Esses dois últimos autores, por exemplo, definiram a capacidade de campo como "a quantidade de água retida no solo após drenado o excesso de água e a taxa do movimento descendente tenha materialmente diminuído, o que ocorre num espaço de dois ou três dias após uma chuva ou irrigação em solos de estrutura e textura permeáveis." Como resultado dessa definição, a capacidade de campo tem sido amplamente aceita como uma característica física do solo. Alguns pesquisadores chegaram até a supor que se tratava de um equilíbrio estático ou uma descontinuidade na capilaridade da água.

Um método amplamente usado em laboratório para determinação da capacidade de campo tem sido o do conteúdo de água no solo em equilíbrio com a sucção matricial de 33 ou 10 kPa. Mais recentemente, leituras feitas a campo com tensiômetros, indicaram que,

na maioria dos solos, a sucção atingida após dois ou três dias de drenagem variou entre 5 e 10 kPa (BRUCE *et al.*, 1983; NOFZIGER *et al.*, 1983). Para irrigações, têm sido comumente aceito que aplicações de certas quantidades de água ao solo preencherão o déficit da capacidade de campo, para uma profundidade definida. A quantidade de água de irrigação a ser aplicada é normalmente determinada com base no déficit da capacidade de campo da zona radicular a ser molhada.

Com o desenvolvimento e predições de teorias e medidas experimentais mais precisas (RICHARDS *et al.*, 1956; OGATA & RICHARDS, 1957), a capacidade de campo não é mais considerada uma constante ou uma propriedade intrínseca do solo, mas preferivelmente um valor arbitrário. Sabe-se que a drenagem interna (ou redistribuição) é realmente contínua e não mostra variações bruscas ou níveis constantes. Na ausência do lençol freático, o processo continua, isto é, a taxa de fluxo decresce indefinidamente. Na maioria dos solos, exceto para solos profundos de textura grosseira, a drenagem interna pode persistir em taxas apreciáveis por muitos dias. A taxa na qual a drenagem torna-se desprezível, depende do processo no qual se tem interesse. O tempo de ocorrência não é constante e depende da interação de vários fatores da equação para fluxo não saturado. Por exemplo, a taxa de drenagem é influenciada pela configuração de impedimento ou por uma camada de textura grosseira no perfil do solo (EAGLEMAN & JAMISON, 1962; MILLER, 1969, 1973; CLOTHIER *et al.*, 1977), pré-infiltração da água no solo e profundidade de molhamento (RICHARDS & MOORE, 1952; BISWAS *et al.*, 1966; CARBON, 1975) e profundidade do lençol freático temporário ou permanente. Também é afetada pela evaporação da superfície do solo e absorção de água pelas plantas.

A capacidade de campo tem sido comumente assumida como o limite máximo de água do solo disponível às plantas. RATLIFF *et al.* (1983), definiram o limite máximo de disponibilidade no campo como o conteúdo de água no solo onde a taxa diária de drenagem, após completo molhamento do solo, foi reduzida entre 0,1 e 0,2 % da armazenagem de água. Usando dados de campo de sessenta e um perfis de solo, obtidos de quinze estados nos EUA, eles observaram que foram necessários de dois a doze dias para que os solos atingissem esses critérios. Alguns solos com camadas restritivas requereram até 20 dias. Estes resultados claramente mostram a limitação do conceito de capacidade de campo de VEIHMEYER & HENDRICKSON (1949).

Recentemente, PREVEDELLO (1995), fez uma análise do processo da redistribuição da água no solo a partir da equação de RICHARDS, inserindo o modelo de BROOKS & COREY (1964) para a curva de retenção no modelo de MUALEM (1976 a) para a condutividade hidráulica relativa. Ele concluiu que a capacidade de campo depende unicamente da escolha da taxa de drenagem que é considerada desprezível, tal como fizeram RATLIFF *et al.* (1983), e das propriedades hidráulicas do perfil de solo, tratando-se, portanto, de uma propriedade dinâmica do meio poroso.

2.5 DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO

VEIHMEYER & HENDRICKSON (1927, 1949, 1950 e 1955) postularam que a água do solo é igualmente disponível às plantas entre a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente, onde ambos são valores constantes para um dado solo.

Baseado nos trabalhos de BRIGGS & SHANTZ (1912) e FURR & REEVE (1945), o ponto de murchamento permanente foi definido como o conteúdo de água no solo para o qual as plantas murcham e não recuperam a turgidez, mesmo quando colocadas em atmosferas com 100 % de umidade relativa durante doze horas.

Este conceito foi amplamente aceito por muitos anos. Mais tarde, foi reconhecido que o estado de energia da água do solo, ao invés da umidade, podia ser o melhor critério universal de disponibilidade às plantas.

Os limites superior e inferior de disponibilidade de água, definidos em termos de sucção de água do solo, foram 10 ou 33 kPa e 1500 kPa, respectivamente (RICHARDS & WEAVER, 1944; SLATER & WILLIAMS, 1965).

RICHARDS & WADLEIGH (1952) e outros pesquisadores, mostraram que a disponibilidade de água no solo às plantas decresce com o decréscimo do conteúdo de água na capacidade de campo ao ponto de murchamento permanente, i. e., o desenvolvimento da planta pode ser reduzido antes mesmo que o ponto de murchamento seja alcançado. Isto levou alguns pesquisadores a postularem que entre o limite máximo e um certo ponto dentro da então chamada capacidade de água disponível, a água é

igualmente disponível, e daquele ponto ao limite inferior, a disponibilidade diminui (THORNTHWAITE & MATHER, 1955; PIERCE, 1958; RITCHIE *et al.*, 1972).

RITCHIE *et al.*(1972), mostraram experimentalmente que este conceito obtido aproxima-se para o algodão (*Gossypium hirsutum*, L.) e para o sorgo granífero (*Sorghum bicolor*, L.). A água do solo até $\frac{3}{4}$ da capacidade de água disponível foi prontamente disponível, após o que a disponibilidade decresceu de modo aproximadamente linear. Essa fração de água disponível pode, contudo, variar com a cultura, solo e condições atmosféricas.

Os avanços nas técnicas experimentais e as melhores compreensões teóricas do fluxo da água no solo, planta e atmosfera conduziram a conceitos dinâmicos de disponibilidade de água no solo às plantas (PHILIP, 1957; GARDNER, 1960; PENMAN, 1949).

Foi postulado que a taxa de absorção de água que poderia sustentar o crescimento normal da planta, num dado instante, não depende somente do estado da água no solo, mas também das condições atmosféricas e propriedades das plantas. As condições atmosféricas ditam a demanda de evapotranspiração (ET), ou a taxa na qual a planta é requerida para transpirar e absorver água do solo para manter sua turgidez. A profundidade, densidade, proliferação e extensão das raízes, ajuste fisiológico da planta ao “stress” hídrico, e as propriedades hidráulicas do solo, determinam a taxa de absorção real e a transpiração, em resposta à demanda imposta.

O clássico experimento de DENMEAD & SHAW (1962), evidencia os conceitos dinâmicos de disponibilidade de água às plantas. Eles mediram a taxa de transpiração da

cultura do milho em "containers" e estes foram colocados a campo sob diferentes condições de aplicação de água e demanda evapotranspirativa. Eles verificaram que para taxas de transpiração potencial moderada (3 a 4 mm/d), a taxa de transpiração real caiu abaixo da taxa potencial, quando a sucção média do solo na zona radicular foi de 2 bar. Quando as taxas de transpiração potencial foram elevadas, de 6 a 7 mm/d, este declínio na taxa de transpiração ocorreu para 0,3 bar. Quando a taxa de transpiração potencial foi somente 1,4 mm/d, a transpiração relativa não decaiu até 12 bar.

A umidade do solo para a qual o declínio na taxa de transpiração relativa ocorre, refere-se ao ponto de perda de turgor. Este ponto, no experimento de DENMEAD & SHAW (1962), variou de 23 % quando a taxa potencial foi 1,4 mm/d, para 34 % quando a taxa de transpiração potencial excedeu 6 mm/d. As medidas de produção de matéria seca sugeriram que quando a umidade do solo foi menor que o ponto de perda de turgor, as plantas virtualmente cessaram de assimilar CO_2 .

É reconhecido que o solo, a planta e a atmosfera formam um sistema físico integrado ou contínuo (PHILIP, 1966).

O fluxo de água ocorre no sistema do local de alta energia potencial para o de baixa energia potencial. O nível de energia de água é o potencial efetivo de água, uma vez que nem todos os componentes do potencial total de água são efetivos em diferentes partes do sistema. A taxa de fluxo de água do solo à raiz da planta ou das folhas à atmosfera, bem como de um local ao outro entre o solo e a planta, é diretamente proporcional ao gradiente de potencial efetivo da água entre eles e, inversamente, às resistências ao fluxo entre eles. O fluxo pode ser na forma de líquido ou vapor.

Duas alternativas próximas têm sido consideradas na modelagem da água do solo pelas plantas (HILLEL, 1980; MOLZ, 1981; FEDDES, 1981): uma raiz singular aproximadamente microscópica e um sistema radicular aproximadamente macroscópico.

Na primeira aproximação, as raízes absorventes têm um certo diâmetro médio, todas são paralelas umas às outras e distribuídas uniformemente dentro de cada camada do solo (GARDNER, 1960; PHILIP, 1966). Na aproximação macroscópica, o sistema radicular é considerado como um todo, mas variando com a profundidade (OGATA et al., 1960; GARDNER, 1964; WHISLER *et al.*, 1968; HILLEL *et al.*, 1976).

O novo conceito dinâmico de água disponível no solo tem tremendas implicações para o manejo da irrigação. O velho conceito de igual disponibilidade de água às plantas entre capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente, resultava em grandes e infreqüentes irrigações. A água era aplicada quando a chamada água disponível era aproximadamente esgotada. A quantidade aplicada era igual a necessária para levar a profundidade da zona radicular à capacidade de campo. Embora esse método de manejo de irrigação concorresse em boa economia e operacionalização do conjunto de irrigação, é de se admitir que a cultura sofresse extremas condições de pobre aeração e excessiva dessecação (RAWLINS & RAATS, 1975; HILLEL, 1980).

O conceito dinâmico de disponibilidade de água no solo requer que a aplicação da irrigação seja mais flexível, baseada em condições meteorológicas, estágio de crescimento da planta, sistema radicular e a taxa do fluxo de água do solo. Com este conceito, modelando o sistema solo-planta-atmosfera no computador, pode-se ajudar na decisão do tempo e a quantidade de irrigação (LEMMON, 1986). Tais cálculos podem ainda fornecer

a frequência e as lâminas de irrigação para manter o nível de umidade na zona radicular sem causar “stress” hídrico, boa aeração e drenagem profunda necessária. Esses cálculos podem ser feitos a partir de medidas em campo, da tensão da água no solo com modernos tensiômetros (MARTHALER *et al.*, 1983), da umidade do solo com sonda de nêutrons ou outros meios, e/ou pelo estado de água da planta com termometria infravermelha ou outros meios (JACKSON, 1982).

Novos métodos de irrigação, incluindo microaspersão e gotejamento de superfície e subsuperfície, têm tornado as alternativas citadas possíveis. Com essas aproximações, é possível otimizar o uso da água do solo bem como de fertilizantes e controlar a salinidade e a qualidade da água de drenagem (RAWLINS & RAATS, 1975).

Isto pode ser feito mesmo em solos com textura grosseira, arenosa ou em terrenos íngremes, que foram considerados impróprios para irrigação pelos métodos tradicionais, bem como sob condições de solos e topografias espacialmente variáveis (HILLEL, 1980).

Há evidências experimentais que atestam o aumento de produtividade como resultado de pequenas e freqüentes irrigações (RAWITZ, 1969; ACEVEDO *et al.*, 1971; HILLEL & GURON, 1973).

2.6 A FRAÇÃO p DE ÁGUA DISPONÍVEL

O estado de umidade do solo no qual a planta não sofre restrição de água é referido a uma fração aproximada p do intervalo de disponibilidade de água compreendido entre a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente.

Portanto, para determinar a evapotranspiração atual (ET_a) de uma cultura, o nível de água disponível no solo deve ser considerado. A ET_a é igual a $ET_{máx}$ quando a água disponível do solo é adequada para a cultura, ou $ET_a = ET_{máx}$. Contudo, a evapotranspiração atual é menor que a evapotranspiração máxima quando a água disponível do solo é limitada. A água disponível do solo pode ser definida como: a fração p onde a água disponível total do solo pode ser esgotada, sem que a evapotranspiração atual venha a ser menor que a evapotranspiração máxima.

$$\text{Com isso, } p = \frac{\theta_{cc} - \theta_{pt}}{\theta_{cc} - \theta_{pmp}}$$

onde: θ_{cc} é a umidade do solo na capacidade de campo (cm^3/cm^3);

θ_{pt} é a umidade do solo no ponto de perda de turgor (cm^3/cm^3);

θ_{pmp} é a umidade do solo no ponto de murchamento permanente (cm^3/cm^3).

Segundo DOORENBOS & KASSAM (1979), o valor da fração p depende: (i) da cultura; (ii) da magnitude da evapotranspiração máxima; e (iii) do solo.

(i) Algumas culturas, como a maioria dos vegetais, necessitam continuamente que o solo esteja úmido para manter a $ET_a = ET_{máx}$; outras, como o algodão e o sorgo, podem esgotar além disso antes que a evapotranspiração atual caia abaixo da evapotranspiração máxima. As culturas podem ser agrupadas de acordo com a fração p , onde a água disponível do solo pode ser esgotada enquanto se mantém a evapotranspiração atual igual a evapotranspiração máxima. O valor de p pode variar com o período de crescimento e em geral será maior durante o período de amadurecimento devido ao baixo nível de evapotranspiração máxima causado pelo baixo valor do coeficiente da cultura (kc).

(ii) Para condições onde a evapotranspiração máxima é alta, p é menor e o solo é comparativamente úmido quando a evapotranspiração atual torna-se menor que a evapotranspiração máxima, comparando-se a quando a evapotranspiração é baixa. Conseqüentemente, a fração p da água disponível do solo acima da qual a evapotranspiração atual é igual a evapotranspiração máxima, varia com o nível de evapotranspiração máxima.

(iii) A água do solo é mais facilmente transmitida e absorvida pela raiz da planta em solos de textura leve que em solos de textura pesada. Valores maiores de p aparentam ser aplicados para solos de textura leve do que para solos de textura pesada. Entretanto, as considerações da textura do solo adicionam pouca exatidão.

A TABELA 1 mostra os valores de p em função da $ET_{m\acute{a}x}$. para a cultura do feijão, segundo DOORENBOS & PRUITT (1984) utilizados para os cálculos de projetos de irrigação.

TABELA 1-VALORES DE p EM FUNÇÃO DA $ET_{m\acute{a}x}$ PARA A CULTURA DO FEIJÃO, SEGUNDO DOORENBOS & PRUITT (1984)

	ET _{máx.} (mm/d)								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,425	0,375	0,35	0,30

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 SOLO

Para a execução do experimento foram utilizados aproximadamente 150 kg de TFSA, proveniente dos primeiros 30 cm de profundidade de um Latossolo Vermelho Escuro, textura argilosa, do Município de São Mateus do Sul-PR. As características química e granulométrica desse material, foram obtidas segundo metodologia descrita por PAVAN et al. (1991) e EMBRAPA (1979), e encontram-se nos Quadros 1 e 2, respectivamente.

QUADRO 1-ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO

pH	meq/100 cm ³ de solo						ppm	%	%	%
	CaCl ₂	Al ⁺³	H+Al	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺				
5,00	0,0	10,4	6,9	4,1	0,35	21,8	8,0	4,1	0,0	52,2

QUADRO 2-FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO

Frações granulométricas			
% areia grossa	% areia fina	%silte	% argila
2,4	2,2	19,4	76,0

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 PREPARO DO SOLO E INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Foram utilizados 105 vasos com capacidade de 1300 ml. Antes do solo ter sido acondicionado nos vasos, foi feita uma adubação de 100 ppm de N, na forma de sulfato de amônio; 200 ppm de P, na forma de super simples; e 100 ppm de K, na forma de cloreto de potássio.

Após a adubação, o solo foi colocado nos vasos, que estavam com o fundo coberto por uma lâmina de espuma de 3 mm de espessura. Em seguida, eles foram dispostos sobre uma mesa na casa de vegetação, para formarem 7 filas de 15 vasos cada uma, como se mostra esquematicamente na Figura 1. Cada fila foi convencionada representar um nível de umidade para os futuros controles de rega, quais sejam: 20, 35, 50, 65, 80, 90 e 100 % da capacidade de campo. Cada grupo de 3 vasos (3 repetições) de cada fila foi destinado a representar um dos cinco intervalos de demanda de água ($ET_{máx.}$), quais sejam: < 2,5; 2,5-5; 5-7,5; 7,5-10; > 10 mm/d. Dessa forma, cada intervalo de demanda de água ficou representado por uma bateria de vinte e um vasos.

A semeadura de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.) foi realizada dia 08/11/1993, com 6 sementes da cultivar Tibagi por vaso. Os vasos foram individualmente levados à capacidade de campo mediante prévia saturação ascendente com água deionizada e posterior remoção do excesso por gravidade.

A germinação ocorreu no dia 13/11/1993 e no dia 16/11/1993 foi feito um primeiro desbaste; um segundo desbaste ocorreu no dia 19/11/1993 para deixar uma planta por vaso. Neste mesmo dia instalou-se um evaporímetro Piché para controle diário da evaporação durante o experimento.

Todas as medidas foram realizadas duas vezes ao dia, nos seguintes horários: às 10:30 h e às 17:00 h.

3.2.2 TOMADA DE DADOS

Os vasos foram conduzidos na capacidade de campo até 17 dias após a germinação, do seguinte modo: media-se o peso diário dos vasos da fila correspondente ao nível de umidade da capacidade de campo, verificava-se o consumo de água desta fila (peso dia anterior - peso do dia), fazia-se a média e irrigava-se cada fila para levar novamente os vasos à capacidade de campo (reposição do que foi evapotranspirado). A perda média diária de água evapotranspirada que se verificava nos vasos correspondentes ao nível de umidade 100 % da capacidade de campo, foi assumida como demanda ideal de água diária ($ET_{máx.}$).

Após o 17º dia, as medidas feitas nos vasos da fila 100 %, além de fornecer a demanda ideal de água, continuaram a ser utilizadas nas dotações de rega, porém, desta vez, respeitando-se as respectivas porcentagens de rega indicadas no esquema da Figura 1,

isto é, somente 20 % dessa quantidade era fornecida aos vasos da fila 20%, 35 % aos vasos da fila correspondente, e assim sucessivamente.

Após o 20º dia, o peso dos vasos passaram a ser medidos diária e individualmente a fim de se conhecer o consumo de água (evapotranspiração) por vaso.

No dia 06/12/1993, o peso de cada vaso foi determinado para se saber o consumo de água no dia, e a vegetação removida da 1ª bateria de 21 vasos a fim de se conhecer a massa seca (secagem a 60º C) acumulada da parte aérea. Paralelamente, o conteúdo de cada um dos 21 vasos foi removido e, após boa homogeneização, retirou-se uma amostra para a determinação das respectivas umidades gravimétricas. Os vasos restantes foram regados obedecendo-se as respectivas porcentagens indicadas na Figura 1.

Após a remoção da primeira bateria de vasos, o peso individual dos vasos remanescentes continuaram a ser diários, tomando-se o cuidado de observar se as condições meteorológicas dos dias subseqüentes ofereciam condições adequadas para os demais intervalos de demanda de água pretendidos (Figura 1). Caso isto não fosse verificado, seriam promovidas condições para intensificar ou diminuir a demanda de água mediante artificios, para que aproximadamente no 4º dia após a remoção da primeira bateria de vasos a evapotranspiração estivesse próxima a uma das desejadas.

Satisfeitas essas duas condições, a 2ª bateria de vasos foi removida no dia 10/12/1993, procedendo-se analogamente à anterior. Prosseguiu-se desta maneira até o final do experimento, sempre atentando para o fato de respeitar o intervalo aproximado de 4 dias entre a remoção de uma bateria e outra. No dia 17/12/1993, relativo a remoção da

4ª bateria, os 21 vasos correspondentes foram envoltos com sacos plásticos e vedados, visando obter a transpiração da cultura entre 17 e 18/12 (24 h).

Para a obtenção dos dados de capacidade de campo e da massa específica do solo, foram colhidas amostras não deformadas de 5 vasos adicionais, reservados para esse fim. Esses vasos, ao longo do experimento, receberam o mesmo tratamento daqueles da fila 100 % da capacidade de campo. No final do experimento, a vegetação aérea foi removida e o solo levado à capacidade de campo mediante imersão de cada vaso em água deionizada e posterior remoção do excesso por gravidade. O valor médio da massa específica do solo foi 1 g/cm^3 e da umidade na capacidade de campo foi $0,5288 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Analogamente, o valor médio da umidade no ponto de murchamento permanente foi encontrado a partir de 20 amostras deformadas do solo utilizado, sujeitas a uma pressão de 1500 kPa na câmara de Richards. O valor médio obtido foi $0,249 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DETERMINAÇÃO DO PONTO CRÍTICO (PONTO DE PERDA DE TURGOR)

As perdas de água dos vasos para as diferentes umidades do solo, em cinco dos dias do experimento, são mostradas na Figura 2.

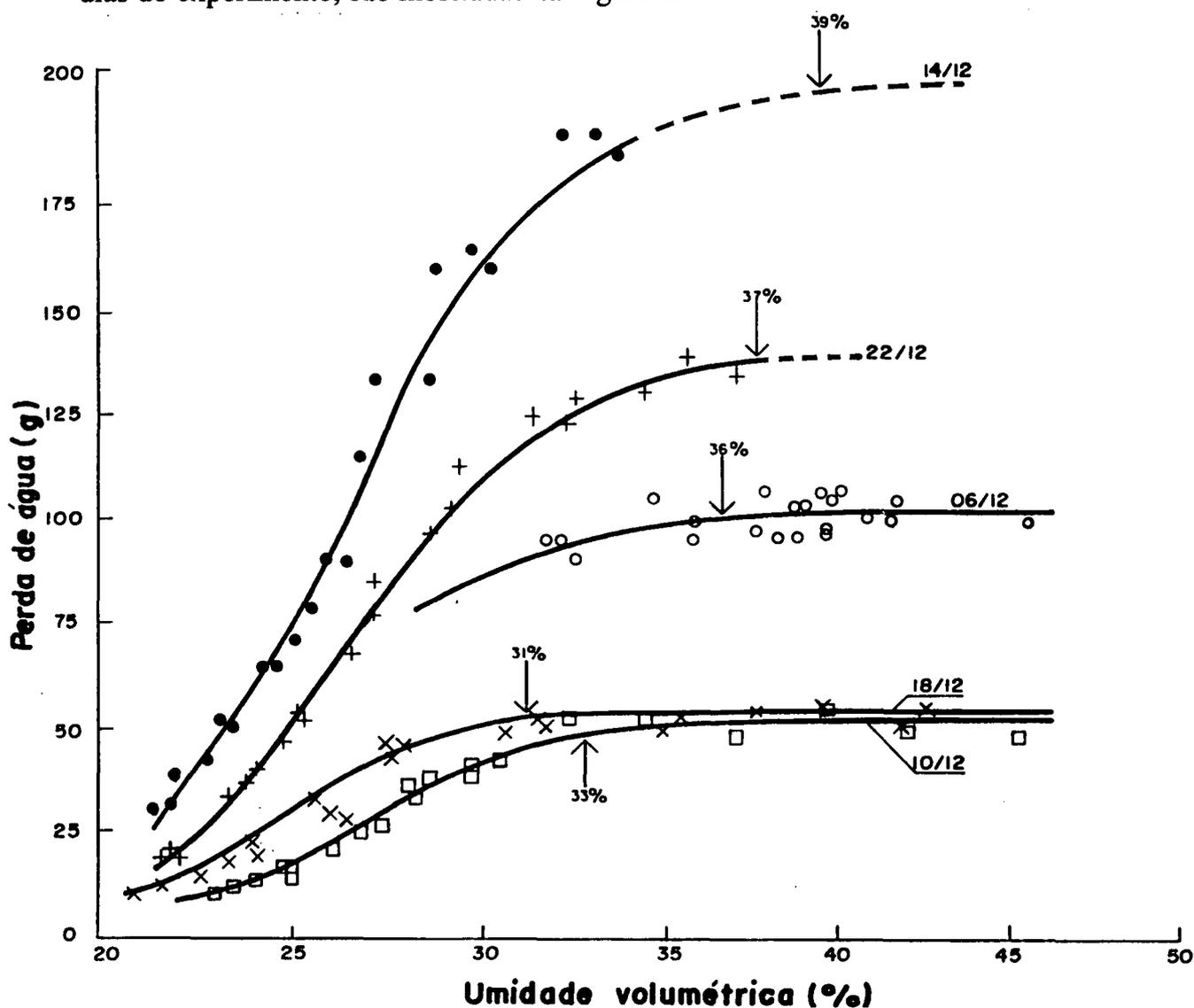


FIGURA 2-PERDA DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO SOLO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO. A CURVA DO DIA 18/12 REFERE-SE SOMENTE À TRANSPIRAÇÃO. AS SETAS INDICAM O VALOR DE UMIDADE ONDE INICIA O PONTO DE PERDA DE TURGOR DA CULTURA.

Observa-se que em todos os dias a taxa de evapotranspiração real decresceu proporcionalmente com a umidade do solo e que com o aumento da taxa potencial, esse decréscimo começou a ocorrer e declinar mais pronunciadamente a partir de umidades mais altas.

O início do declínio de cada curva (indicado pelas setas para cada um dos dias) corresponde ao valor da umidade onde inicia o ponto crítico (perda de turgor) e as plantas virtualmente cessam seu crescimento. De fato, foi observado ao longo do experimento que nos dias em que a evapotranspiração era alta, as plantas que estavam em vasos cuja umidade do solo era menor que a necessária para manter-lhes o turgor, foram murchando; as mesmas plantas, em dias de baixa evapotranspiração, não mostraram nenhum sinal de murchamento quando a umidade era maior que a necessária para mantê-las túrgidas.

Essas observações corroboram com as feitas por DENMEAD & SHAW (1962). Os pontos de perda de turgor, estimados pelas curvas de transpiração, concordam com as observações feitas da incidência do murchamento durante o experimento conduzido pelos autores, com milho.

BRUNINI *et al.* (1981), comprovaram em seu experimento que para a cultura do arroz, sob condições de demanda evaporativa baixa ($ET_{m\acute{a}x.} < 3$ mm/d), a evapotranspiração real foi igual à potencial até 50% da água disponível do solo. Porém, quando a evapotranspiração potencial foi superior a 5 mm/d, a evapotranspiração real tornou-se inferior à potencial a partir de 90% do total de água disponível no solo.

ANDRADE *et al.* (1991), encontraram o valor do ponto crítico de 44% da água disponível para a cultura do milho. DENMEAD & SHAW (1962), encontraram um valor

bastante superior para a mesma cultura, isto é, de 80% da água disponível sob uma demanda evaporativa de 5,6 mm/d. Por outro lado, RITCHIE (1973), trabalhando também com milho, observou que o ponto crítico só foi atingido quando o teor de água do solo correspondeu a 25% da água extraível, sob uma demanda de aproximadamente 6,0 mm/d.

Essas diferenças nos valores do ponto crítico para uma mesma planta, sob condições semelhantes de demanda evapotranspirativa, provavelmente devam-se às variações nas características edafoclimáticas, e ao desenvolvimento diferenciado do sistema radicular das plantas que, explorando volumes diferentes do solo, comportam-se também de forma distinta, conforme observou RITCHIE (1973).

Existem várias maneiras pelas quais a planta reage às condições adversas para evitar a sua desidratação. Uma destas é o fechamento dos estômatos, pois quando a folha atinge um certo valor de potencial de água, potencial crítico, os estômatos se fecham evitando assim a desidratação da planta até que condições adversas, de falta de água no solo ou alta demanda evaporativa da atmosfera, sejam eliminadas.

Variações cíclicas na taxa de transpiração, de periodicidade muito mais curta do que variações diurnas, foram observadas em girassol, acompanhadas por variação de temperatura de folha e abertura de estômatos (WINTER, 1984).

Essas relações explicam-se por mecanismos de “cadeia”; se as condições atmosféricas são tais que a taxa de transpiração exceda a capacidade da planta de atendê-la, os estômatos tendem a se fechar; as taxas de transpiração e esfriamento por evaporação tendem a cair e, portanto, a temperatura da folha tende a subir. Com a redução da taxa de

transpiração, aumenta o potencial da água na folha e os estômatos novamente se abrem. Assim, a série cíclica de eventos recomeçaria.

BEADLE (1972) e DUBÉ (1972), citados por BRUNINI (1987), realizaram estudos com plantas de milho em casa de vegetação, cujos resultados mostraram que a transpiração não foi afetada até que o potencial da água na folha atingiu um valor crítico ocasionando o fechamento dos estômatos.

Na Figura 2, as curvas do dia 10/12 e 18/12 referem-se a processos distintos de perdas, sendo que o dia 18/12 é correspondente à transpiração e o dia 10/12 à evapotranspiração da cultura. Uma vez que no dia 18/12 houve perda de água somente por transpiração, é fácil concluir que a prevenção da evaporação da água do solo resultasse numa curva em que o declínio iniciasse para umidade menor do que a curva correspondente ao dia 10/12.

4.2 RELAÇÃO ENTRE A $ET_{m\acute{a}x}$ E AS EVAPORAÇÕES DIÁRIAS

A relação entre a evapotranspiração máxima com os dados da evaporação máxima diária obtida no evaporímetro Piché, é apresentada na Figura 3.

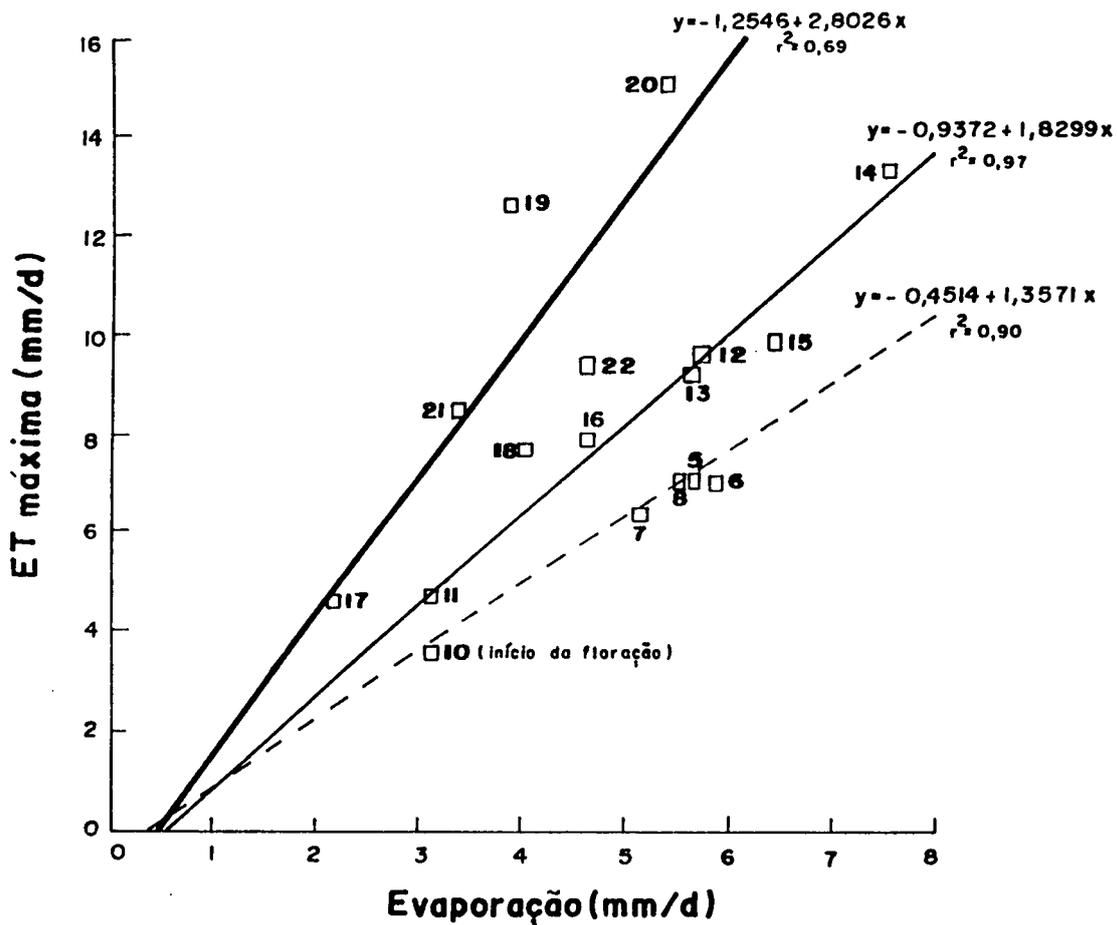


FIGURA 3-RELAÇÃO ENTRE A TAXA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA À CAPACIDADE DE CAMPO ($ET_{m\acute{a}x}$) E A EVAPORAÇÃO ESTIMADA PELO EVAPORÍMETRO PICHÉ. OS NÚMEROS AO LADO DOS PONTOS INDICAM OS DIAS DO MÊS DE DEZEMBRO/93, AGRUPADOS EM 3 PERÍODOS.

Foram fixados três períodos relativos aos dias do experimento, agrupados da seguinte maneira: dias 5, 6, 7, 8 e 10, primeiro período, correspondente à reta com tracejado pequeno; dias 11,12,13,14,15, e 16, segundo período, cuja reta é em traço cheio; e dias 17, 18, 19, 20, 21 e 22, terceiro período, representado pela reta de tracejado maior. Nota-se que o coeficiente angular dessas relações lineares foi crescente no tempo, isto é, para cada grupo de seis dias, em decorrência do aumento da área foliar.

BRUNINI *et al.* (1981), também concluíram que a evapotranspiração real esteve positivamente relacionada com o índice da área foliar, sendo que na época de florescimento foi constatada uma maior demanda em água pela cultura (arroz) em todos os tratamentos.

A taxa de evapotranspiração varia irregularmente como um resultado de mudanças transitórias no ambiente. A demanda evaporativa afeta claramente as relações entre assimilação/transpiração, matéria-seca/transpiração e produção/evapotranspiração. A influência da demanda evaporativa é quantificada através do “déficit” de pressão ou pelos fatores ambientais que influenciam a evapotranspiração máxima (HOWELL, 1990). De fato, durante o experimento foi observado que nas horas mais quentes do dia (geralmente das 11:00 às 17:00 h) as plantas apresentavam um murchamento temporário.

Segundo WINTER (1984), existem variações diárias regulares no conteúdo de água das plantas, que atinge um mínimo à tarde e um máximo durante a noite; estas, relacionam-se parcialmente com as mudanças na taxa de transpiração. Para o autor, é de se esperar que as folhas mostrem uma diminuição de volume similar durante a tarde.

4.3 EFEITOS DO “STRESS” HÍDRICO NA PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA

Com os valores de matéria seca encontrados, traçaram-se as curvas da Figura 4.

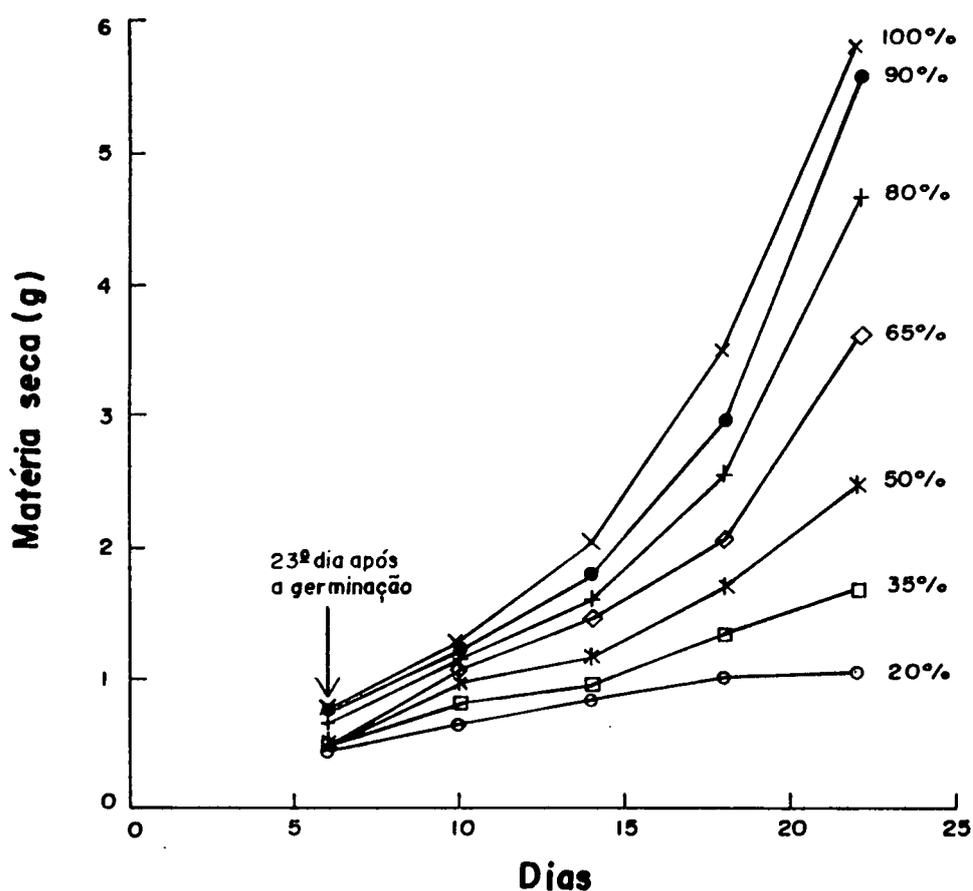


FIGURA 4-PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA DA PARTE AÉREA DO FEJÓEIRO EM FUNÇÃO DO TEMPO, SUJEITAS ÀS VÁRIAS CONDIÇÕES DE “STRESS” HÍDRICO: 20%; 35%; 50%; 65%; 80%; 90% E 100% DA CAPACIDADE DE CAMPO.

A Figura 4 confirma o que foi possível observar durante o experimento: o crescimento das plantas é maior em solos cujo conteúdo de água se aproxima da condição de capacidade de campo, do que nos solos onde estas são sujeitas ao “stress” hídrico.

Esta evidência sugere que quando a umidade do solo é menor que a necessária para mantê-la túrgida, a planta virtualmente cessa de assimilar dióxido de carbono. Ou seja, reduz seu crescimento, reduzindo o valor de sua matéria seca, uma vez que o ganho em peso é menor em tecido murcho do que em tecido túrgido.

Os “déficits” de água nos estágios críticos de desenvolvimento da cultura têm sido relatados por afetar contrariamente a produção da cultura (HAGAN *et al.*, 1959).

Observou-se que as plantas sujeitas ao “déficit” hídrico apresentaram murchamento temporário ou permanente (dependendo da quantidade de água repostas), redução na taxa de crescimento e escurecimento da cor da folhagem.

Essas observações concordam com WINTER (1984). Segundo ele, um abaixamento do potencial da água na planta afeta diferentes órgãos de diferentes formas. O efeito mais comum do “stress” hídrico é uma redução na taxa de crescimento e desenvolvimento da folhagem. Em beterraba e gramíneas, uma redução no “stress” induz uma taxa maior de crescimento geral do que em plantas que nunca estiveram sujeitas à este, mas a produção final das plantas, nas quais o “stress” foi diminuído, nunca chega a superar a produção daquelas que nunca estiveram sujeitas a “stress”.

Existe uma relação estreita entre fotossíntese e transpiração uma vez que o CO₂ e a água movem-se simultaneamente através do estômato. A condutividade difusiva da abertura do estômato impõe um controle maior nas taxas de ambos os processos, embora a

concentração interna de CO₂ e a externa de concentração de vapor de água determine a magnitude dos respectivos gradientes. Contudo, mudanças na resistência estomatal podem não necessariamente afetar a transpiração e a assimilação de maneira similar (HOWELL, 1990). COWAN (1977) e COWAN & FARQUHAR (1977), propuseram que as plantas ajustam dinamicamente sua resistência estomatal para manter um balanço ótimo entre assimilação e transpiração. Para uma dada taxa de transpiração diária, um ajuste na resistência estipula a assimilação máxima diária, e para dada taxa de assimilação diária, a taxa de transpiração diária é minimizada.

A relação entre assimilação e transpiração é fundamentada porque a união entre o influxo de CO₂ e o efluxo de água vem das folhas.

DOORENBOS & KASSAM (1979) consideraram os efeitos dos períodos críticos de “déficits” de água na produção de diversas culturas de interesse agrícola. Um dos maiores problemas envolvidos na identificação dos períodos críticos para as culturas na relação de “déficits” de água é quantificado na proporção do “déficit” ou “stress” de água da cultura.

Segundo ASRAR *et al.* (1984), se “déficits” de água na cultura para estágios de crescimento específicos afetam diferencialmente a produção econômica da cultura, afetarão também a relação entre produção econômica e produção de matéria seca. Em vários experimentos com milho, onde os “déficits” na evapotranspiração foram intencionalmente criados em estágios específicos do crescimento da cultura, não houveram efeitos maiores desses “déficits” na separação dos grãos e foi evidente uma produção superior de matéria seca. Contudo, é perceptível que certos parâmetros

ambientais podem produzir resultados significativamente diferentes, conforme observaram também COLLINS & YUMA (1975) citados por STEWART *et al.* (1977).

4.4 TAXA DE CRESCIMENTO EM RELAÇÃO À EVAPOTRANSPIRAÇÃO OU TRANSPIRAÇÃO

A Figura 5 apresenta a taxa de crescimento da cultura em relação à evapotranspiração ou transpiração, conforme o caso.

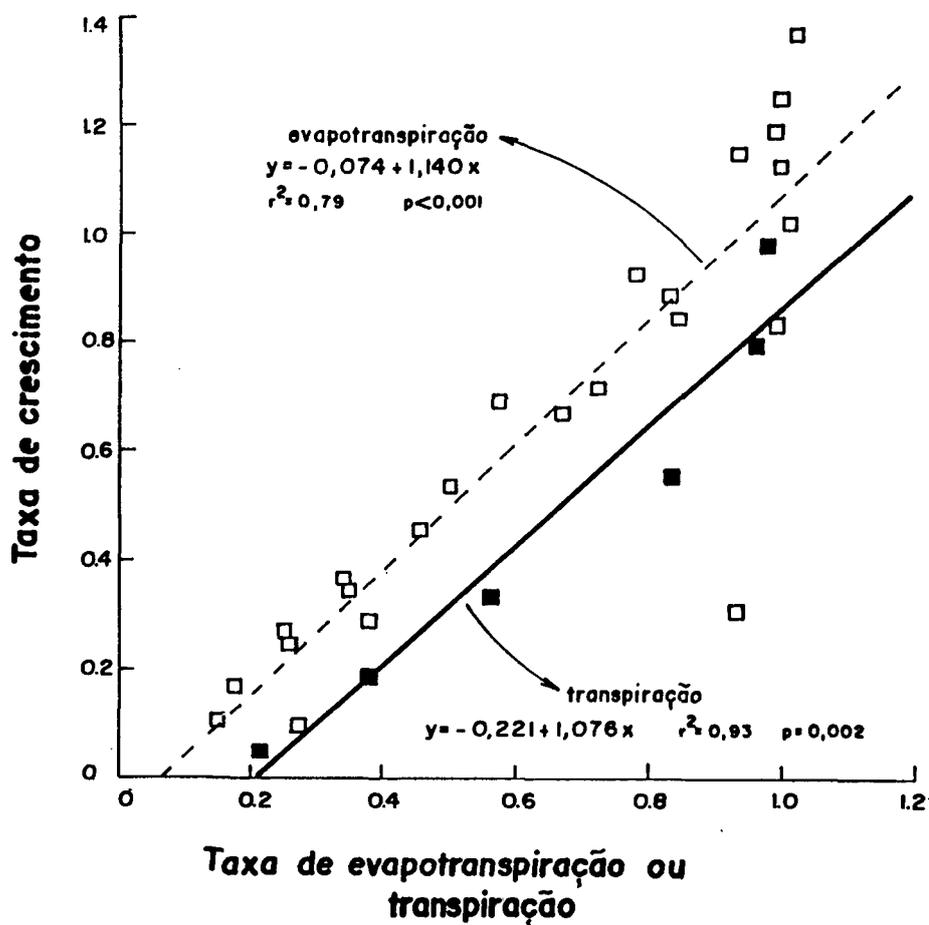


FIGURA 5-RELAÇÃO DA TAXA DE CRESCIMENTO DA MATÉRIA SECA DA PARTE AÉREA DO FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DA TAXA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO OU TRANSPIRAÇÃO, CONFORME O CASO.

Os valores da taxa de crescimento foram obtidos através da seguinte equação:

$$\text{Taxa de crescimento} = \frac{tgn\%}{tg100\%}$$

onde:

$tgn\%$ é a tangente na curva da Figura 4 correspondente ao nível de umidade do solo (porcentagem de rega); $tg100\%$ é a tangente na curva da Figura 4 correspondente ao nível de umidade na condição de capacidade de campo. Esses valores de tangente foram obtidos por meio da função “spline” cúbica, segundo PREVEDELLO & PREVEDELLO (1987).

Os valores da taxa de evapotranspiração foram obtidos pela equação:

$$\text{Taxa de evapotranspiração} = \frac{(\text{PerdaH}_2\text{O})n\%}{(\text{PerdaH}_2\text{O})100\%}$$

onde:

$(\text{PerdaH}_2\text{O})n\%$ é a perda de água ao nível de umidade do solo (porcentagem de rega); $(\text{PerdaH}_2\text{O})100\%$ é a perda de água na condição de capacidade de campo.

Pode-se observar que a taxa de crescimento ficou reduzida às porcentagens de rega que foram administradas à cultura. Percebe-se uma relação direta entre a perda de turgor, causada pela intensidade do “stress” hídrico e a taxa de crescimento da cultura.

A demanda evaporativa afeta a divisão entre a evaporação do solo e a transpiração que depende da umidade da superfície do solo e do estágio de desenvolvimento da cultura e afeta diretamente a proporção de transpiração.

A relação da produção de matéria seca com a transpiração é quantitativamente similar à relação entre assimilação e transpiração. Os principais fatores que afetam a relação são o caminho do metabolismo do CO₂ e os fatores ambientais (evaporação potencial; temperatura do ar e das folhas).

A evapotranspiração, bem como a transpiração, podem entre outros fatores, ser limitadas pela quantidade de água, o que conseqüentemente reflete-se na taxa de crescimento da cultura. O crescimento celular e as taxas fotossintéticas são mais facilmente afetadas à elevadas taxas de transpiração. Segundo KLAR (1984), o crescimento celular é diretamente relacionado ao turgor celular, devido às características estruturais das paredes das células que não permitem extensão quando a turgência cai abaixo de um valor crítico.

A Figura 5 mostra que qualquer redução no teor de água do solo além da fração *p* de água disponível, tem como resultado uma diminuição linear na taxa de crescimento da cultura abaixo do seu potencial máximo. Essas observações corroboram com observações feitas por WINTER, 1984; ASRAR *et al.*, 1984; e DOORENBOS & KASSAM, 1979. Quando a água é limitada, a taxa de assimilação, o crescimento da planta, e conseqüentemente a produção, ficam relacionados quantitativamente ao fornecimento de água.

Para KLAR (1984), a transpiração interage com o teor de água do solo e este, perdendo água, pode atingir condições hídricas que inabilitam a planta de continuar seu ciclo de crescimento de modo satisfatório, por atingir condições de tensão de água inadequadas.

De acordo com STANHILL (1986), claramente a taxa de transpiração está associada com a espécie da planta e resistências de difusão atmosférica para o CO₂ e a água, e vários parâmetros ambientais (os mais notáveis são a radiação solar, temperatura do ar e o “déficit” do vapor de pressão).

A biomassa produzida pela planta é em sua maior parte resultado da taxa de assimilação e troca de CO₂ que ocorre principalmente nas folhas.

Segundo MONTEITH (1977), a produção de matéria seca depende de uma quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura. A intercepção da luz pela cobertura depende de vários fatores, como a formação da mesma e a existência de um índice de área foliar.

de WIT (1958), e ARKLEY (1963) citado por ARRUDA (1987), afirmam que para se obter máximas produções de biomassa e possivelmente grãos, a transpiração da cultura deve também ser maximizada. Não devem, em outras palavras, ocorrer “déficits” hídricos que venham impor restrições à taxa de transpiração da cultura, pois poderá resultar em decréscimo de produção.

BRIGGS & SHANTZ (1913 a), num experimento realizado para verificar os efeitos das condições ambientais na produção de matéria seca e transpiração, concluíram

que a taxa de transpiração para o trigo foi aproximadamente proporcional à evaporação ocorrida, mas a taxa de transpiração para o sorgo apresentou-se constante.

de WIT (1958), refez o experimento em containers e concluiu que a produção de matéria seca da cultura relacionou-se linearmente com a taxa de transpiração.

Num experimento realizado por HOWELL (1990), com trigo, o autor observou um comportamento linear na relação entre produção máxima e evapotranspiração, o que corrobora com o comportamento apresentado pela Figura 5, que também mostra-se linear.

Os coeficientes angulares apresentados na referida figura, seja para a relação $\frac{ET_{atual}}{ET_{max}}$ como para a $\frac{T_{atual}}{T_{max}}$, são aproximadamente iguais. Com isso, o decréscimo na taxa de crescimento da cultura com o “déficit” hídrico ocorre aproximadamente na mesma proporção, seja pelo processo transpirativo como evapotranspirativo, como se ambos fossem governados por fatores comuns. Os coeficientes lineares, por sua vez, mostram que um decréscimo na transpiração atual acarreta num maior comprometimento na taxa de crescimento da cultura do que um mesmo decréscimo na evapotranspiração atual.

4.5 VALORES DE p ENCONTRADOS EM COMPARAÇÃO COM OS FORNECIDOS POR DOORENBOS & PRUITT (1984)

Com a obtenção dos valores de umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), umidade no ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}) e umidade no ponto de perda de turgor (θ_{PT}) encontrados durante o experimento, foi possível determinar os valores de p (ver item 2.6) para os dias 06; 10; 14; 22, quais sejam, respectivamente, 0,6390; 0,7113; 0,4966 e 0,5681. Nesses dias, as evapotranspirações foram, respectivamente, 7,00; 3,55; 13,30 e 9,40 mm/d.

Com esses valores de p , juntamente com aqueles fornecidos por DOORENBOS & PRUITT (1984), para os diferentes valores de evapotranspiração máxima, indicados na Tabela 1, traçaram-se as curvas da Figura 6.

Observa-se que os valores de p são maiores quando os valores das evapotranspirações máximas são menores, o que concorda com DOORENBOS & KASSAM (1979).

O comportamento das curvas é similar. Percebe-se que a curva de DOORENBOS & PRUITT (1984) impõe uma maior frequência de rega em igualdade de condições. Os valores de p visivelmente variaram com os diferentes níveis da evapotranspiração máxima. Uma vez que o valor da fração p depende da cultura e da magnitude da evapotranspiração máxima (DOORENBOS & PRUITT, 1984), era esperado que a curva obtida neste trabalho se apresentasse mais próxima daquela sugerida pelos referidos

autores. Todavia, ela se mostrou ligeiramente superior, como pode ser observado na Figura 6.

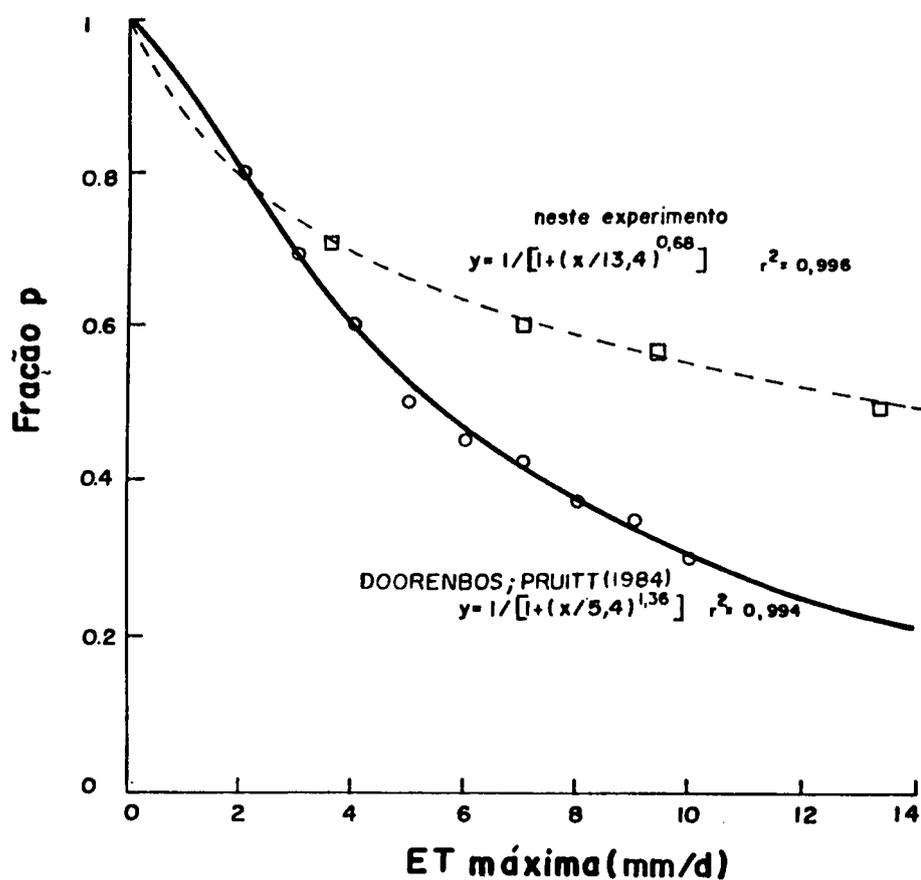


FIGURA 6-FRAÇÃO p DE ÁGUA DISPONÍVEL EM FUNÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO MÁXIMA PARA A CULTURA DO FEIJÃO.

O fato do experimento ter sido realizado em vasos não influenciaria nisto, uma vez que os mesmos exigem uma maior frequência de rega pois sua água é esgotada mais rapidamente.

Esse comportamento ligeiramente superior, portanto, talvez possa se dever ao fato dos solos utilizados para a realização dos experimentos serem diferentes, embora DOORENBOS & PRUITT (1984) não mencionem para qual textura de solo as frações são correspondentes. Esses valores são utilizados em todo o mundo de maneira generalizada, independentemente da natureza do solo.

DOORENBOS & KASSAM (1979), afirmam que maiores valores de p aparentam ser aplicados para solos de textura leve do que para solos de textura pesada mas que, entretanto, as considerações da textura do solo adicionam pouca exatidão.

A fração p é um processo dinâmico e dependente de inúmeros fatores como: condições climáticas; tipo, fase de desenvolvimento e estado nutricional da planta; propriedades físicas do solo etc. Segundo RITCHIE *et al* (1972), a fração de água disponível pode, por isso, variar com a cultura, solo e condições atmosféricas, conforme também foi observado neste experimento.

De acordo com BROWN (1982), a fração de argila presente em um solo pode influenciar na sua condutividade hidráulica saturada e não saturada. Os poros menores em um solo que contém uma maior fração de argila, reduzirão o movimento da água no solo quando este estiver saturado. Mas na não saturação, esses poros menores que predominam em solos argilosos continuarão a conduzir água normalmente à taxas maiores do que em solos de textura grossa, já que os grandes poros desses meios, quando não saturados,

transformam-se numa barreira efetiva ao movimento de água. Os solos em geral, portanto, possuem diferentes condutividades hidráulicas. Segundo HILLEL (1972), a condutividade é obviamente afetada pela estrutura bem como pela textura, sendo mais afetada se o solo for bastante poroso, quebradiço ou agregado do que se for firmemente compactado e denso. A condutividade não depende somente da porosidade total mas também, do tamanho dos poros de condução.

Quando a umidade do solo que cerca as raízes diminui, a água se desloca de um local mais úmido até a superfície radicular. Segundo a equação de Buckingham-Darcy, essa quantidade de água que se desloca é proporcional à condutividade hidráulica do conteúdo de água existente e ao gradiente de potencial total. Se a quantidade de água que é fornecida às raízes for mantida, então o potencial mátrico das mesmas será cada vez mais negativo. Por conseguinte, nas proximidades das raízes diminuem 3 propriedades do solo que são interligadas: o potencial mátrico, o conteúdo de água e a condutividade hidráulica. Nos dias mais secos a condutividade hidráulica do solo decresce rapidamente produzindo uma mudança no conteúdo de água. Assim, de acordo com COLLIS-GEORGE *et al* (1971), se duas plantas necessitarem de iguais quantidades de água, o fato de murcharem com diferentes intensidades em dois solos diferentes, é devido à condutividade hidráulica de cada um deles e das diferenças no gradiente de potencial que faz com que as raízes dessequem o solo. Isto torna-se mais complexo, porque a mesma planta mostrará sintomas mais ou menos intensos em um mesmo solo se o clima muda.

Foi possível observar que a cultura e a evapotranspiração são fatores que, combinadamente, ditam o valor de p , corroborando com DOORENBOS & KASSAM.

(1979). Porém, como se discutiu acima, o tipo de solo, ou melhor, as propriedades hidráulicas do solo parecem decisivas no aspecto da disponibilidade de água às plantas, o que contraria DOORENBOS & KASSAM (1979), quando afirmam que “às considerações da textura do solo adicionam pouca exatidão”. E a fração p de água disponível, apesar de ser um índice adimensional do solo capaz de se relacionar dinamicamente com os fatores climáticos, parece não ser suficiente para dispensar as propriedades hidráulicas desses meios. Por outro lado, a despeito da importância que a fração p de água disponível representa na prática da irrigação, as diferenças encontradas entre os valores obtidos neste trabalho e aqueles sugeridos por DOORENBOS & PRUITT (1984), não chegam a comprometer a recomendação dessa fração sugerida pelos mesmos autores, pelo menos para a cultura do feijão, porquanto ela resulta, no máximo, em irrigações mais frequentes e com menores lâminas de rega. A propósito, nos últimos anos tem havido um entendimento mais compreensivo e avançado das relações interativas entre solo, planta e clima com respeito à utilização (controle) da água de irrigação. Dentre esses avanços destacam-se as vantagens das regas de alta frequência e baixo volume de aplicação de água (HILLEL, 1990).

5 CONCLUSÕES

A umidade crítica do solo, correspondente ao ponto de perda de turgor das células das plantas, abaixo da qual a cultura do feijão não evapotranspira idealmente, é variável e determinada pelas condições edafoclimáticas.

A relação entre a Evapotranspiração máxima (ET_{máx.}) com os dados de evaporação obtidos pelo evaporímetro Piché, foi linear e crescente com o desenvolvimento da cultura do feijão, até o início da frutificação, quando o experimento foi interrompido.

Qualquer redução no teor de água do solo abaixo da fração p de água disponível, tem como resultado uma diminuição linear na taxa de crescimento da cultura abaixo de seu potencial máximo.

A fração p de água disponível em função da ET_{máx.} obtida neste trabalho diferiu daquela proposta por DOORENBOS & PRUITT (1984). As propriedades hidráulicas do solo podem ter sido a principal causa dessas diferenças, mas que, contudo, não inviabilizam a recomendação dessa fração sugerida pelos autores para a cultura do feijão.

ANEXOS

ANEXO 1- PERDAS DE ÁGUA (g) E RESPECTIVAS UMIDADES GRAVIMÉTRICAS (%) ENCONTRADAS NO EXPERIMENTO PARA OS DIAS 5, 6, 7, 8, 10 E 11/12. OS NÚMEROS DA PRIMEIRA COLUNA REFEREM-SE ÀS PORCENTAGENS DE REGA RELATIVAS AOS VASOS CONDUZIDOS NA CAPACIDADE DE CAMPO.

%	5/12	6/12		7/12	8/12	10/12		11/12
	g	g	%	g	g	g	%	g
100	102,7	98,1	45,45	87,4	98,7	50,1	42,61	66,8
100	97,1	103,2	43,82	94,8	97,4	48,4	45,32	68,3
100	100,8	99,6	43,73	90,5	104,5	54,1	41,92	66,7
90		99,1	42,78			48,5	39,10	
90		105,3	42,26			53,2	36,44	
90		94,7	41,81			52,3	34,04	
80		104,2	41,98			43,3	32,07	
80		97,3	41,78			41,9	31,19	
80		104,0	41,63			41,5	31,07	
65		94,3	41,07			36,4	29,38	
65		103,0	41,13			35,3	29,60	
65		101,6	40,84			38,3	30,02	
50		105,4	39,94			28,1	28,61	
50		93,8	40,21			25,5	27,96	
50		97,2	39,71			22,7	27,14	
35		98,2	37,78			18,9	25,82	
35		94,7	37,72			16,2	25,80	
35		103,8	36,68			16,8	25,60	
20		94,1	33,90			14,4	24,72	
20		95,3	33,50			12,8	24,10	
20		90,0	34,31			11,0	23,60	

ANEXO 2- PERDAS DE ÁGUA (g) E RESPECTIVAS UMIDADES GRAVIMÉTRICAS ENCONTRADAS NO EXPERIMENTO PARA OS DIAS 12, 13, 14, 15, 16 17 E 18/12. OS NÚMEROS DA PRIMEIRA COLUNA REFEREM-SE ÀS PORCENTAGENS DE REGA RELATIVAS AOS VASOS CONDUZIDOS NA CAPACIDADE DE CAMPO.

%	12/12	13/12	14/12		15/12	16/12	17/12	18/12
	g	g	g	%	g	g	g	%
100	138,9	132,0	191,4	34,87	143,2	114,7	64,9	110,0
100	137,5	133,4	186,7	35,60	141,7	113,4	66,2	110,2
100	135,8	129,7	191,6	33,80	140,2	111,1	66,4	112,0
90			158,1	31,74				
90			164,3	31,11				
90			157,3	30,07				
80			133,0	29,86				
80			133,0	28,44				
80			114,0	27,94				
65			90,1	26,79				
65			90,0	27,60				
65			78,4	26,46				
50			70,1	25,91				
50			64,0	25,02				
50			64,1	25,21				
35			50,0	24,13				
35			41,9	23,41				
35			51,8	23,72				
20			37,8	22,31				
20			30,3	22,14				
20			30,5	21,63				

ANEXO 3- PERDAS DE ÁGUA (g) E RESPECTIVAS UMIDADES GRAVIMÉTRICAS (%) ENCONTRADAS NO EXPERIMENTO PARA OS DIAS 18, 19 20, 21, E 22/12. OS NÚMEROS DA PRIMEIRA COLUNA REFEREM-SE ÀS PORCENTAGENS DE REGA RELATIVAS AOS VASOS CONDUZIDOS NA CAPACIDADE DE CAMPO.

%	18/12*		19/12	20/12	21/12	22/12	
	g	%	g	g	g	g	%
100	54,3	42,81	177,8	215,1	121,7	130,0	36,41
100	51,1	42,34	179,8	212,8	124,8	138,8	37,63
100	52,2	41,76	181,7	216,6	119,8	133,4	39,04
90	53,4	39,81				123,7	33,07
90	50,8	37,47				121,6	34,02
90	49,3	36,92				128,2	34,32
80	48,7	32,18				97,.	30,03
80	52,1	33,09				10,.7	30,64
80	50,2	33,33				11,.1	30,88
65	44,0	29,14				67,4	27,71
65	44,0	28,76				78,0	28,31
65	43,3	28,83				84,2	28,42
50	32,3	26,68				46,9	25,53
50	28,6	27,12				54,2	26,03
50	27,7	27,49				51,4	26,36
35	19,7	24,82				33,9	23,96
35	21,4	24,71				40,1	24,77
35	18,5	23,96				35,4	24,61
20	9,8	21,09				19,7	21,93
20	11,7	22,03				19,4	22,42
20	12,1	23,18				21,2	22,37

* Os valores do dia 18/12 correspondem à transpiração das plantas.

ANEXO 4-DADOS DA EVAPORAÇÃO ESTIMADA PELO EVAPORÍMETRO PICHÉ
(mm/d) PARA OS RESPECTIVOS DIAS.

dia	evap(mm/d)
5/12	5,6
6/12	5,85
7/12	5,11
8/12	5,5
9/12	5,47
10/12	3,11
11/12	3,11
12/12	5,7
13/12	5,6
14/12	7,5
15/12	6,4
16/12	4,6
17/12	2,15
18/12	4,0
19/12	3,85
20/12/	5,35
21/12	3,36
22/12	4,6

ANEXO 5-PRODUÇÃO DE MASSA SECA DAS PLANTAS DE FEIJÃO (g) NOS DIAS 6, 10, 14, 18, e 22/12. OS NÚMEROS DA PRIMEIRA COLUNA REFEREM-SE ÀS PORCENTAGENS DE REGA RELATIVO AOS VASOS CONDUZIDOS NA CAPACIDADE DE CAMPO.

%	6/12	10/12	14/12	18/12	22/12
20	0,50	0,601	0,804	1,071	1,053
20	0,49	0,642	0,793	1,006	1,019
20	0,45	0,707	0,908	0,983	1,088
35	0,42	0,840	0,832	1,376	1,781
35	0,46	0,783	0,987	1,238	1,707
35	0,56	0,837	1,049	1,457	1,588
50	0,52	0,908	1,130	1,873	2,371
50	0,46	0,940	1,242	1,677	2,474
50	0,47	1,062	1,141	1,583	2,538
65	0,53	1,094	1,460	2,035	3,552
65	0,56	1,020	1,383	2,161	3,708
65	0,54	1,096	1,541	1,933	3,489
80	0,48	1,100	1,544	2,508	4,602
80	0,47	1,083	1,672	2,709	4,777
80	0,46	1,177	1,621	2,403	4,574
90	0,54	1,043	1,890	2,974	5,484
90	0,47	1,185	1,810	2,942	5,789
90	0,42	1,192	1,670	2,883	5,389
100	0,54	1,080	1,743	3,380	5,487
100	0,56	1,180	1,868	3,120	5,637
100	0,54	1,160	1,909	3,310	5,976

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ACEVEDO, E.; HSIAO, T.C. ; HENDERSON, D.W. Immediate and subsequent growth response of maize leaves to changes in water status. **Plant. Physiol.**, Bethesda, v.48, p.631-636, 1971.
- 2 ANDRADE, C.L.T.; SANS, L.M.A.; COUTO, L.; FERREIRA, P. A.; DEDIYAMA, G.C. Evapotranspiração da cultura do milho em função da disponibilidade de água em um latossolo vermelho-escuro argiloso álico da região de sete lagoas (MG). **Rev. bras. Ci. Solo**, Campinas, n.15, p.351-356, 1991.
- 3 ARRUDA, F.B. Uso da água na produção agrícola. p. 177-199. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA. (1984: Campinas) **Anais**, São Paulo: 1987. Fundação Cargill. p. 177-199.
- 4 ASRAR, G.; HIPPS, L.E.; KANEMASU, E.T. Assessing solar energy and water use efficiencies in winter wheat: A case study. **Agric. For. Meteorol.** Amsterdam, v. 31, p.47-58, 1984.
- 5 BERLATO, M.A.; MOLION, L.C.B. Evaporação e evapotranspiração. **Boletim Técnico**, IPAGRO, Porto Alegre, n. 7, p. 95, 1981.
- 6 BISWAS, T.D.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Redistribution of soil water after infiltration. **Water Resour. Res.**, Washington, v. 2, p.513-514, 1966.
- 7 BRIGGS, L.J.; SHANTZ, H.L. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. **Bur. Plant Industry Bull** . Washington: USDA, p. 26-33, 1912.
- 8 BRIGGS, L.J.; SHANTZ, H.L. The water requirement of plants: I. Investigation in the Great Plains in 1910 and 1911. **Bur Plant Ind. Bull**. Washington: USDA, 1913 a.
- 9 BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. **Hidrology paper**. Colorado: Colorado State Univ., v. 3, 1964.
- 10 BROWN, K.W. Shrinking and swelling of clay, clay strength, and other properties of clay soils and clays. Mineral in Soil Environments. **Soil Science Society of America**. Wincosin: Madison, 1982.

- 11 BRUCE, R.R.; DANE, J.H.; QUISENBERRY, V.L.; POWELL, N.L.; THOMAS, A.W. Physical characteristics of soils in the southern region: Cecil. Georgia: **Agric. Exp. Stn. South. Coop. Ser. Bull**, Georgia, p.267, 1983.
- 12 BRUNINI, O.; GROHMANN, F.; SANTOS, J.M. Balanço hídrico em condições de campo para dois cultivares de arroz sob duas densidades de plantio. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 5, p.1-6, 1981.
- 13 BRUNINI, O. Consumo hídrico e parâmetros ecológicos da cultura do milho. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA. (1987: Campinas) **Anais**. Campinas: Fundação Cargill, 1987, p.93-122.
- 14 CAMARGO, A.P. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. **Boletim Instituto Agonômico**, Campinas, nº 116, p. 120, 1960.
- 15 CARBON, B.A. Redistribution of water following precipitation on previously dry sandy soils. **Aust. J. Soil Res.**, East Mealbourne, v.13, p.19, 1975.
- 16 CLOTHIER, B.E.; SCOOTER, D.R.; KEN, J.P. Water retention in soil underlain by a coarse-textured layer: Theory and a field application. **Soil Sci.**, Baltimore, v.123, p.393-399, 1977.
- 17 COLLIS-GEORGE, N.; DAVEY, B.G.; SMILES, D.E. **Suelo atmosfera y fertilizantes**. Barcelona: Aedos, 1971. 334p. (Fundamentos de agricultura moderna; 1).
- 18 COWAN, I.R. Stomatal behavior and environment. **Adv. Bot. Res.**, New York, v.4, p.1176-1227, 1977.
- 19 COWAN, I.R.; FARQUHAR, G.D. Stomatal function in relation to leaf metabolism and environment. **Symp. Soc. Exp. Biol.**, Cambridge, v.31, p.471-505, 1977.
- 20 DENMEAD, O.T.; SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronom. J.**, Madison, v. 54, p.385-394, 1962.
- 21 de WIT, C.T. **Transpiration and crops yields**. Institut Voor Biologisch en Scheikundig Onderzoek van Landbouwgewassen, Versl. Landbouwk. Onderz. Netherlands: Wageningen, 1958.
- 22 DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome : FAO, 1979.

- 23 DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1984.
- 24 EAGLEMAN, J.R.; JAMISON, V.C. Soil layering and compaction effects on unsaturated moisture movement. **Soil Sci. Am. Proc.**, Madison, v.26, p.519-522, 1962.
- 25 EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979.
- 26 FEDDES, R.A. Water use models for assessing root zone modification. In: ARKIN, G.F.; TAYLOR, H. M. **Modifying the plant environment to reduce crop stress**. St Joseph, ASAE Monogr., 1981, p. 347-390.
- 27 FURR, J.A.; REEVE, J.O. The range of soil moisture percentages through which plants undergo permanent wilting in some soils from semi-arid, irrigated areas. **J. Agric. Res.**, London, v.71, p. 149-170, 1945.
- 28 GARDNER, W.R. Dynamic aspects of water availability to plants. **Soil Sci.**, Baltimore, v.89, p.63-73, 1960.
- 29 GARDNER, W. R. Relation of root distribution to water uptake and availability. **Agron. J.** , Madison, v.56, p.35-41, 1964.
- 30 HAGAN, R. M.; VAADIA, Y.; RUSSEL, M.B. Interpretation of plants responses to soil moisture regimes. **Adv. Agron.**, San Diego, California, v.11, p. 97-113. 1959.
- 31 HILLEL, D. **Soil and water; physical principles and process**. New York, Academic Press, 1972. 288 p.
- 32 HILLEL, D.; GURON, Y. Relation between evapotranspiration rate and maize yield. **Water Resour. Res.**, Washington, v. 9, p.743-748, 1973.
- 33 HILLEL, D.; TALPAZ, H.; van KEULEN, H. A macroscopic-scale model of water uptake by a nonuniform root system and of water and salt movement in the soil profile. **Soil Sci.** , Baltimore, v.121, p.242-255, 1976.
- 34 HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academy Press, 1980.
- 35 HILLEL, D. Dole of irrigation in agricultural systems. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA; CSSA; SSSA; 1990.

- 36 HOWELL, T.A. Relationships between crop production and transpiration, evapotranspiration, and irrigation. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1990. p. 391-434.
- 37 JACKSON, R.D. Canopy temperatures and crop water stress. **Adv. Irrig.**, Madison, v.1, p.43-85, 1982.
- 38 KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984.
- 39 LEMMON, H. Comax: An expert system for cotton crop management. **Science**, Madison, v.233, p.29-33, 1986.
- 40 MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 2 ed. São Paulo: Agronômica Ceres. 1967.
- 41 MARTHALER, H. P.; VOGELSANGER, W; RICHARD, F.; P.J.WIERENGA. A pressure transducer for field tensiometers. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.47, p.624-627, 1983.
- 42 MILLER, D.E. Flow and retention of water in layered soils. **Conserv. Res. Rep.**, Washington, v.13, 1969.
- 43 MILLER, D.E. Water retention and flow in layered soil profiles. p.107-117. In: BRUCE, R.R. et al. **Field soil water regime**. Madison: SSSA Spec. Publ. 5., 1973, p.107-117.
- 44 MOLZ, F. J. Models of water transport in soil-plant system: A review. **Water Resour. Res.**, Washington, v.17, p.1245-1260, 1981.
- 45 MONTEITH, J.L. Climate and efficiency of crop production in Britain. **Phil. Trans. R. Soc. London Ser.**, London, v. 281, p.277-294, 1977.
- 46 MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of insaturated porous media. **Water Resour. Res.**, Washington, v. 12, p. 513-522, 1976 a.
- 47 NOFZIGER, D.L.; WILLIAMS, J.R.; HORNSBY, A.G. & WOOD, A.L. Physical characteristics of soils of the southern region: Bethany, Konawa, and Tipton series. **Agric. Exp. Stn. South. Coop. Ser. Bull.** Oklahoma, p.265, 1983.
- 48 OGATA, G.; RICHARDS, L.A. Water content change following irrigation of bare field soil that is protected from evaporation. **Soil Sci. Am. Proc.**, Madison, v.21, p.355-356, 1957.

- 49 OGATA, G.; RICHARDS, L.A.; GARDNER, W.R. Transpiration of alfafa determined from soil water content changes. *Soil Sci.*, Baltimore, v.89, p.179-182, 1960.
- 50 PAVAN, M.A. et al. **Manual de análise química do solo**. Londrina: IAPAR, 1991.
- 51 PENMAN, H.L. The dependence of transpiration on weather and soil conditions. *J. Soil Sci.*, Oxford, v.1, p.74-89, 1949.
- 52 PHILIP, J.R. The physical principles of soil water movement during the irrigation cycle. *3rd Congr. Int. Comm. Irrig. Drain.* Question 8:8.125-8.154. 1957.
- 53 PHILIP, J. R. Plant water relations: Some physical aspects. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, Palo Alto, v.17, p. 245-268, 1966.
- 54 PIERCE, L.T. Estimating seasonal and short-term fluctuations in evapotranspiration in meadow crops. *Bull. Am. Meterol. Soc.*, Boston, v.39, p.73-78, 1958.
- 55 PREVEDELLO, C.L.; PREVEDELLO, B.M.S. Emprego da função "spline" cúbica na obtenção da condutividade hidráulica em solo não saturado. *Rev. Set. Ciênc. Agr.*, Curitiba, v.9, p.121-132, 1987.
- 56 PREVEDELLO, C.L. **Física do solo**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. Curso de pós-graduação em Agronomia, 1995. 540 p. (Apontamentos de aula).
- 57 RATLIFF, L. F.; RITCHIE, J.T.; CASSEL, D.K. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory measured properties. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.47, p.770-775, 1983.
- 58 RAWITZ, E. The dependence of growth rate and transpiration on plant and soil physical parameters under controlled conditions. *Soil Sci.*, Baltimore, v.110, p.172-182, 1969.
- 59 RAWLINS, S. L.; RAATS, P.A.C. Prospects for high frequency irrigation. *Science*. Madison, v.188, p.604-610, 1975.
- 60 RICHARDS, L.A.; WEAVER, L.R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. *Soil Sci.*, Baltimore, v.56, p.331-339, 1944.
- 61 RICHARDS, L. A.; MOORE, D.C. Influence of capillary conductivity and depth of wetting on moisture retention in soil. *Trans. Am. Geophys. Union*, Washington, v.33, p.4, 1952.

- 62 RICHARDS, L.A., GARDNER, W.R.; OGATA, G. Physical processes determining water loss from soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, v.20, p.310-314, 1956.
- 63 RICHARDS, L. A.; WADLEIGH, C.H. Soil water in plant growth. In: SHAW, B.T. (Ed.). **Soil physical conditions and plant growth**. New York: Academic Press, 1952. p. 73-251. v. 2.
- 64 RITCHIE, J. T.; BURNETT, E.; HENDERSON, R.C. Dryland evaporative flux in a subhumid climate: III. Soil water influence. **Agron. J.**, Madison, v.64, p.168-173, 1972.
- 65 RITCHIE, J.T. Influence of soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn canopy. **Agron.J.**, Madison, v.65, p.894-897, 1973.
- 66 SLATER, P. J.; WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils I. A critical comparison of techniques for determining the available water capacity and moisture characteristic curve of a soil. **J. Soil Sci.**, Oxford, v.16, p.1-12, 1965.
- 67 STANHILL, G. Water use efficiency. **Adv. Agronomy.**, San Diego, California, v. 39, p.53-85. 1986.
- 68 STEWART, J.I.; HAGAN, R.M.; PRUITT, W.O.; HANKS, R.J.; RILEY, J.P.; DANIELSON, R.E.; FRANKLIN, W.T.; JACKSON, E.B. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. **Water Res. Lab. Publ.**, Madison, v.151, p.1, 1977.
- 69 THORNTWAITE, C. W.; MATHER, J.R. The water budget and its use in irrigation. **Yearb. Agric.**, Washington, v.1955, p.346-358, 1955.
- 70 VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiol.**, Bethesda, v.2, p.71-78, 1927.
- 71 VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. **Soil Sci.**, Madison, v. 32, p. 181-193, 1949.
- 72 VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A.H. Soil moisture in relation to plant growth. **Annu. Rev. Plant Physiol.**, Palo Alto, v.1, p.285-304, 1950.
- 73 VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A.H. Does transpiration decrease as the soil moisture decreases? **Trans. Am. Geophys. Union**, Washington, v.36, p. 425-448, 1955.

- 74 WHISLER, F.D.; KLUTE, A; MILLINGTON, R.J. Analysis of steady-state and transpiration from a soil column. **Soil Sci. Am. Proc.**, Madison, v.32, p.167-174, 1968.
- 75 WINTER, E.J. **A água, o solo e a planta**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1984. 169 p.