BALANÇO HÍDRICO E ENERGÉTICO NA CULTURA IRRIGADA
DO FEIJOEIRO EM LATOSSOLO ROXO

EMILIO SAKAI
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Dr. ORIVALDO BRUNINI

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração: "Solos e Nutrição de Plantas".

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Dezembro, 1989

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Sakai, Emilio
S158b Balanço hídrico e energético na cultura irrigada
do feijoeiro em latossolo roxo. Piracicaba, 1989.
121p.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Feijão - Irrigação - Balanço de energia 2. Fei
jão - Irrigação - Balanço hidrico 3. Latossolo roxo -
Irrigação I. Escola Superior de Agricultura Luiz de
Queiroz, Piracicaba.

CDD 635.652

BALANÇO HÍDRICO E ENERGÉTICO NA CULTURA IRRIGADA
DO FEIJOEIRO EM LATOSSOLO ROXO

EMÍLIO SAKAI

Aprovado em: 19.03.1990

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Klaus Reichardt

ESALQ/USP

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi

ESALQ/USP

Prof. Dr. Orivaldo Brunini

IAC

Prof. Dr. Orivaldo Brunini

- Orientador -

A meus pais
Goro e Takeca

OFEREÇO

À minha esposa Sônia

e a meus filhos

Gisele, Vivien e Rafael

DEDICO

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Dr Orivaldo Brunini, pela amizade, orientação precisa e apoio irrestrito durante o curso de Pos-Graduação e elaboração desta;

Aos Drs. Altino Aldo Ortolani, Rogério Remo Alfonsi, Mario José Pedro Junior e Marcelo Paes de Camargo, pesquisadores científicos da Seção de Climatologia Agrícola do Instituto Agrônômico, pelo constante e inestimável apoio e sugestões na execução deste trabalho;

Ao pesquisador científico Dr Flávio Arruda Bussmeyer, pelas sugestões, colaboração e revisão dos textos;

Aos Drs. Klaus Reichardt e Paulo Leonel Libardi, professores do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ e do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, pelas facilidades oferecidas;

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pelos ensinamentos;

Aos colegas do Curso de Pós-Graduação, pelo convívio agradável;

Aos colegas Luis Alberto Sáes, Issao Ishimura, Kiyoshi Yainai, Mauro Sakai, Mamor Fujiwara, Regina Célia de Matos Pires Silva, pelo excelente ambiente de trabalho, amizade, estímulo e colaboração;

A professora Ligia Abramides Testa, pela correção de verbáculo;

A desenhista Lílíana Solhá, pelo esmero na confecção das figuras;

Ao Instituto Agronômico do Estado de São Paulo (IAC), pela oportunidade concedida;

Ao Curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, pela possibilidade em realizar o curso;

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudos;

À minha esposa e aos meus filhos, companheiros e amigos de todas as horas, razão maior dos meus esforços;

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho, meu muito obrigado.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xiii
RESUMO	xvii
SUMMARY	xix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Considerações sobre o feijoeiro	3
2.1.1. Irrigação do feijoeiro	4
2.2. Balanço hídrico	7
2.2.1. Balanço hídrico de campo	7
2.2.1.1. Drenagem profunda	8
2.2.1.2. Evapotranspiração	9
2.2.1.2.1. Coeficiente de cultura	11
2.3. Balanço de energia	12
2.3.1. Resistência da planta ao fluxo transpiratório	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1. Caracterização da área experimental	18
3.1.1. Local	18
3.1.2. Clima	18
3.1.3. Solo	19
3.1.3.1. Textura	19
3.1.3.2. Densidade e porosidade	20
3.1.3.3. Velocidade de infiltração da água no solo	21
3.1.3.4. Curva de retenção da água ..	21
3.1.3.5. Condutividade hidráulica ..	24
3.2. Esquema experimental	25
3.3. Característica da cultura	30

	Página
3.4. Instrumental	32
3.4.1. Anemômetro	32
3.4.2. Temperatura do ar e abrigo termométrico seco e úmido	32
3.4.3. Radiômetro líquido	33
3.4.4. Radiação global	33
3.4.5. Radiação fotossinteticamente ativa ..	33
3.4.6. Placas medidoras do fluxo de calor no solo	33
3.4.7. Sistema de aquisição de dados	34
3.4.8. Porômetro	34
3.4.9. Evaporação	35
3.5. Balanço hídrico	35
3.5.1. Variação no armazenamento de água no solo	36
3.5.2. Precipitação pluvial e irrigação ...	37
3.5.3. Drenagem profunda	37
3.5.4. Evapotranspiração	38
3.6. Coeficiente de cultura	39
3.7. Balanço de energia	40
3.8. Aspectos fisiológicos da cultura	42
3.8.1. Resistência estomática à difusão de vapor d'água, temperatura e transpiração foliar	42
3.8.2. Eficiência no uso da água	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. Irrigações	44
4.2. Comportamento estomático do feijoeiro	46
4.3. Balanço hídrico	48
4.3.1. Adição de água no sistema	57
4.3.2. Variação de armazenamento de água no solo	57
4.3.3. Drenagem profunda	57
4.3.4. Evapotranspiração	59

	Página
4.4. Balanço de energia	65
4.4.1. Dia 28.8.86 (42 DAG)	65
4.4.2. Dia 11.9.86 (56 DAG)	69
4.4.3. Dia 16.9.86 (61 DAG)	70
4.4.4. Dia 23.9.86 (68 DAG)	75
4.4.5. Dia 1 ^o .10.86 (76 DAG)	76
4.5. Coeficiente de cultura	81
4.6. Produção final	86
4.6.1. Benefício da irrigação e uso da água.	86
4.6.2. Relação entre a produção e a evapo- transpiração	90
5. CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
APÊNDICE	110

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Resultados de análise granulométrica, fracionamento segundo escala de Atterberg, do latossolo roxo eutrófico, Campinas, realizada pela Seção de Pedologia do IAC.	19
2 Resultados da densidade global e da partícula e porosidade total do solo, ao longo do perfil do latossolo roxo eutrófico, na área experimental. Cada valor é média de oito repetições.	20
3 Número, lâminas e intervalo médio nas irrigações aplicadas após o florescimento no ensaio com feijoeiro, em Campinas, SP.	46
4 Resistência estomática total à difusão de vapor d'água (r_s), nos tratamentos de irrigação do feijoeiro medida no período da manhã (8h30m-10h) e da tarde (14-15h). Cada valor é média tomada de dez folhas totalmente expostas e recém-amadurecidas.	47
5 Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (E_{Tr}), na cultura do feijoeiro para o tratamento 100%AD em 1986, Campinas, SP.	49

Tabela

Página

6	Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr), na cultura do feijoeiro para o tratamento 75%AD, em 1986, Campinas, SP.	50
7	Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr), na cultura do feijoeiro para o tratamento 50%AD, em 1986, Campinas, SP.	51
8	Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr), na cultura do feijoeiro para o tratamento 25%AD, em 1986, Campinas, SP.	52
9	Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr), na cultura do feijoeiro para o tratamento DHI, em 1986, Campinas, SP.	53
10	Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr), na cultura do feijoeiro para o tratamento M75%, em 1986, Campinas, SP.	54

Tabela

Página

11	Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr), na cultura do feijoeiro para o tratamento M50%, em 1986, Campinas, SP.	55
12	Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr), na cultura do feijoeiro para o tratamento DHN, em 1986, Campinas, SP.	56
13	Resultados do coeficiente de cultura (K_c) obtidos nos tratamentos de irrigação ao longo do ciclo da cultura do feijoeiro, de 10.8 a 16.10.86, em Campinas, SP. A ETo foi calculada a partir da evaporação de tanque classe A, e a ETr, pelo método do balanço hídrico de campo, em períodos de quatro dias.	83
14	Comparação entre coeficientes de cultura (K_c) calculados pelo método do balanço hídrico de campo (B.H.), em períodos de quatro dias, e pelo método do balanço de energia (B.E.) ao curso do dia indicado, em seis diferentes épocas e em três tratamentos de irrigação do feijoeiro. ETo : evapotranspiração de referência, calculada pelo tanque classe A - C.A - (média de quatro dias), e por Penman no dia indicado.	85

Tabela	Página
15	Valores acumulados de irrigação, intervalo médio entre irrigações, produção final de grãos e eficiência no uso da água (EUA), em função dos tratamentos de irrigação na cultura do feijoeiro, Campinas, SP.
	87

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Velocidade de infiltração e infiltração acumulada em função do tempo, observada na área experimental, pelo método do anéis concentricos.	22
2 Curva característica da água no solo, obtida em laboratório, para a camada de 0-60 cm da área experimental.	23
3 Infiltração horizontal da água para a camada 0-30cm, em função da raiz quadrada do tempo, na área experimental.	27
4 Condutividade hidráulica em função da umidade do solo, determinada em laboratório, a partir da infiltração horizontal da água em coluna de solo.	28
5 Representação esquemática da área experimental com feijão: localização dos mastros (M), com instrumental micrometeorológico, o laboratório, com o sistema de aquisição de dados, e a área com os seis blocos de tratamentos de irrigação (25 a 100% AD, DHI e DHN).	29
6 Esquema da armação de suporte para a proteção de parcelas contra as precipitações, instalada nos tratamentos de irrigação.	31
7 Irrigações e precipitações (mm) ocorridas nos diferentes tratamentos da cultura do feijoeiro, no inverno de 1986, Campinas, SP.	45

Figura	Página
8 Evapotranspiração de referência e evapotranspiração real (ET _r) acumulada para diferentes níveis de aplicação de água na cultura do feijoeiro, determinadas no inverno de 1986, em Campinas, SP.	63
9 Variação temporal da evapotranspiração de referência (ET _o) e real (ET _r), em períodos após a aplicação de água (38 mm aos 36 DAG e 70 mm aos 62 DAG) no tratamento DHI da cultura do feijoeiro, no inverno de 1986, Campinas, SP.	64
10 Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 28.8.86, no tratamento 100%AD.	67
11 Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 28.8.86, no tratamento M75%. ..	68
12 Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 11.9.86, no tratamento 100%AD.	71
13 Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 11.9.86, no tratamento M75%. ..	72

Figura	Página
14 Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 16.9.86, no tratamento 100%AD.	73
15 Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão no dia 16.9.86, no tratamento M75% ...	74
16 Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 23.9.86, no tratamento 100%AD.	77
17 Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 23.9.86, no tratamento M75%. ..	78
18 Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 1 ^o .10.86, no tratamento 100%AD.	79
19 Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 1 ^o .10.86, no tratamento M75%.	80

Figura	Página
20 Produção de grãos do feijoeiro em função da irrigação acumulada nos tratamentos de irrigação.	88
21 Produção de grãos do feijoeiro em função da evapotranspiração (ET _r) acumulada nos tratamentos de irrigação.	91
22 Relação entre a produção de grãos do feijoeiro e o número de vagens por área obtida nos tratamentos de irrigação - DHI e de 25 a 100%AD.	93

BALANÇO HÍDRICO E ENERGÉTICO NA CULTURA IRRIGADA
DO FEIJOEIRO EM LATOSSOLO ROXO

Autor: EMILIO SAKAI

Orientador: ORIVALDO BRUNINI

RESUMO

O presente trabalho teve o objetivo de estudar o comportamento de alguns parâmetros que afetam o manejo das irrigações do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) relacionados à disponibilidade de água no solo e às condições ambientais.

O estudo foi realizado no Centro Experimental de Campinas - Instituto Agronômico do Estado de São Paulo, (IAC), no inverno de 1986, em área de superfície plana de latossolo roxo. Inicialmente, determinaram-se os parâmetros físico-hídricos do solo e, durante o desenvolvimento da cultura, acompanhou-se sistematicamente a unidade do solo, a abertura estomática e o balanço energético nos tratamentos de irrigação.

A evapotranspiração real (ET_r), determinada através do balanço hídrico de campo em períodos de quatro dias, foi relacionada com a evapotranspiração de referência, estimada pela evaporação do tanque classe A, e com a ET_r obtida pelo balanço de energia (diária).

O consumo total de água pela cultura mostrou-se linearmente relacionado à porcentagem de água disponível e à lâmina total de irrigação, e de forma assintótica com a produção de grãos.

Os resultados mostraram que o intervalo médio entre irrigações menor que nove dias, após o florescimento além de aumentar a perda de água por drenagem profunda, não elevou significativamente a produção final de grãos.

Houve recuperação total na abertura estomática dos folíolos do feijoeiro após estresse hídrico, porém, quando este foi severo, acarretou demora na resposta da taxa transpiratória.

O coeficiente de cultura mostrou-se relacionado com o desenvolvimento da cultura e das condições de umidade do solo: sob estresse moderado, foi afetado pela resistência estomática e pela evapotranspiração potencial e, sob estresse severo, praticamente, somente pela intensidade da evapotranspiração potencial.

WATER AND ENERGY BALANCE OF IRRIGATED FIELD BEANS GROWN
ON A DUSKY LATOSOL

Author: EMILIO SAKAI

Adviser: ORIVALDO BRUNINI

SUMMARY

This work investigates the water consumption and crop coefficient of field beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as related to available water and environmental conditions.

A field experiment was conducted during the winter season of 1986, on a flat, well drained dusky latosol, in the Experimental Center of Campinas, Instituto Agronomico, State of São Paulo. Soil physical conditions, soil water profile, energy balance and stomatal resistance were monitored along the season of five irrigation time intervals.

Actual evapotranspiration (ET_a) was determined by field water balance over periods of four days, and the results compared to daily ET_a by Bowen ratio and reference evapotranspiration (ET_0) estimated by pan evaporation.

The water consumption was linearly related to percentage available water and irrigation depth, but asymptotically by to bean grain yield.

Stomatal resistance was reversely affected by water shortage. But water application after severe water stress did not show readily recover on transpiration rate.

The results showed that mean irrigation interval of nine days or less, after flowering, did not increase significantly grain yield eventhough increased losses of water by drainage.

Crop coefficient (K_c) was dependent on crop development, environmental and soil water conditions; under moderated stress, K_c was affected by stomatal resistance and reference evapotranspiration; under severe stress, K_c was mostly affected by reference evapotranspiration.

1. INTRODUÇÃO

O feijão, produto básico na dieta alimentar do povo brasileiro, é, para muitos, a principal fonte de proteínas. Há décadas, a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tem recebido a atenção das diferentes áreas da pesquisa agrônômica. Contudo, sua produtividade média se estabilizou em um patamar muito baixo em relação ao seu potencial genético.

Entre os fatores que afetam a produção vegetal, destaca-se a água; é o meio de difusão dos solutos nas células e solvente para a maioria das reações bioquímicas; funciona ainda como regulador da temperatura, pela alta capacidade calorífica, sendo básica na sustentação dos tecidos vegetais, dada a sua incompressibilidade.

Nas plantas em desenvolvimento, há uma continuidade no fluxo da água desde o solo até a atmosfera. A absorção, a translocação e a transpiração da água pelas plantas dependem, além dos parâmetros inerentes ao solo, de certas características fisiológicas próprias à planta e, principalmente, das condições micrometeorológicas ambientais. Entre as propriedades do solo que comandam esses movimentos, a condutividade hidráulica e o potencial da água no solo são os principais, sendo regulados pelas suas características físicas: textura, estrutura e porosidade. Períodos de estiagem e alta demanda evaporativa da atmosfera são freqüentes e, muitas vezes, de conseqüências desastrosas, ocasionando déficit hídrico às plantas e diminuição na produtividade do feijoeiro.

O conhecimento dos processos e fatores que influenciam a demanda de água (evapotranspiração) e a água não-retida na camada de atuação efetiva do sistema radicular das culturas no solo - drenagem profunda - constituem duas valiosas fases do balanço hídrico real.

A importância de conhecer a evapotranspiração de uma cultura resulta de uma estreita relação entre a transpiração e a produção de biomassa da planta (WIT, 1958). A dificuldade de separar a transpiração da evaporação do solo levou ao uso dos dois termos conjugados: evapotranspiração (ET).

Para um estudo detalhado das reais necessidades hídricas de um cultivo, é preciso conhecer os fatores físicos do solo, particularmente no que se relaciona à disponibilidade hídrica, e os parâmetros da cultura: resistência estomática, potencial de água na folha, área e temperatura da folha e eficiência do uso da água, além dos elementos climáticos: radiação líquida, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento.

Nesse contexto, realizou-se o presente estudo com o feijão cultivar Carioca-80-SH, em condições de campo, com o objetivo de: (a) estudar o consumo e o efeito do manejo da irrigação para produção de grãos, em condições variáveis de disponibilidade hídrica no solo; (b) correlacionar esse consumo hídrico com parâmetros climáticos e fisiológicos, e (c) comparar as estimativas da ET, pelo método do balanço de energia e do balanço hídrico no campo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1.Considerações sobre o feijoeiro

Originário da região semitropical da América Central, onde a precipitação média varia entre 500 e 1800mm, e a temperatura média oscila de 17 a 30°C, o feijoeiro caracteriza-se como planta herbácea, com sistema radicular de natureza pivotante e ciclo vegetativo de 75-120 dias. Consome, ao longo do ciclo, segundo as condições edafoclimáticas, 300 a 500 mm de água, sobretudo nas fases de emergência, florescimento e formação dos legumes consoante DOORENBOS & KASSAM (1979) e requer, para a germinação, uma temperatura do solo acima de 15°C. A 18°C, a germinação leva cerca de doze dias e, a 25°C, cerca de sete dias. As variedades, em geral, não são afetadas pela duração do dia.

No Estado de São Paulo, o principal cultivar de feijão recomendado para plantio pela Secretaria da Agricultura, nas três épocas de cultivo, é o Carioca 80-SH: apresenta alta produtividade, valor biológico e resistência a muitas raças do fungo da antracnose e da ferrugem e ao vírus do mosaico comum (BULISANI & ROSTON, 1987).

Segundo BULISANI (1987), o cultivo de feijão de inverno irrigado expandiu-se nos últimos anos, sobretudo nas regiões Centro-Norte e Centro-Oeste do Estado. A disponibilidade de recursos hídricos, energia elétrica e

condições ecológicas favoráveis ao seu desenvolvimento, em maio-setembro, com boa sanidade, veio solucionar a problemática de produção de sementes, evitando a disseminação dos agentes causais de moléstias limitantes.

Embora a cultura apresente sistema radicular de natureza pivotante, autores de regiões tropicais observaram que grande parte das raízes se encontram nos primeiros 20 cm. INFORZATO & MIYASAKA (1963) relatam que, em podzólico vermelho-amarelo, 74,5% do sistema radicular está contido nos primeiros 10 cm do perfil do solo e 83,6%, nos primeiros 20 cm; em podzolizado de Lins e Marília, 87,4% do sistema radicular concentra-se até a profundidade de 10 cm e 97,4% até 20 cm. REICHARDT et alii (1974) verificaram, em experimentação de campo, que 90% das raízes se encontravam nos primeiros 30 cm do perfil do solo. ROVIRA (1975), estudando o cultivar Carioca, observou a totalidade do sistema radicular até 50 cm de profundidade, e determinou que, lateralmente, a raiz do feijoeiro cultivado em espaçamento de 50 cm chega a atingir 25 cm. CAIXETA et alii (1983) verificaram que o sistema radicular da planta se concentra na camada superficial (0-20cm) do solo e responde a irrigações freqüentes. Para STANSELL & SMITTLE (1980), o manejo de água no solo, na profundidade de 30 cm, foi adequado para elevada produtividade de grãos, embora o feijoeiro também tenha extraído água de camadas abaixo dessa profundidade.

2.1.1. Irrigação do feijoeiro

Segundo HAGAN et alii (1967), estresse de umidade é geralmente associado com redução do conteúdo de água no solo, na zona que compreende o sistema radicular, no ponto em que a taxa de evapotranspiração excede a de absorção das raízes e/ou transmissão de água para as par-

tes da planta acima do solo. Estresse moderado denota marcante perda de turgor durante o dia, recuperando o estado íntegro à noite, porém sem danos à folha. Estresse severo se refere à falta de água na planta a ponto de, a noite, ela não se recuperar. Períodos longos de estresse na época de florescimento reduzem o número de vagens e de grãos por vagem e, antes do florescimento, retardam o desenvolvimento da planta. Estresse prolongado na maturação diminui a produtividade, ao reduzir o peso dos grãos. Conforme ROBINS et alii (1956), há decréscimo de 20% no rendimento de sementes, quando deficiências hídricas visíveis persistem antes ou durante a floração ou, ainda, antes da maturação das primeiras vagens.

LAMBERTH (1950), estudando os fatores que influenciam o pegamento das vagens, concluiu que a disponibilidade de água era o fator ambiental mais importante. BERNARDO et alii (1970) observaram as maiores produções de feijão nos tratamentos em que se irrigava quando a tensão da água no solo atingia 0,05-0,065 MPa. Nos tratamentos mais úmidos, as plantas apresentavam maior precocidade e, acima de 0,075 MPa, sintomas de falta de água.

BURMAN & BOLMONT (1961), em pesquisas em casa de vegetação, realizaram experimento onde as parcelas de feijão recebiam irrigação quando o potencial matricial da água no solo alcançava -0,05; -0,10; -0,20 e -0,40 MPa; no tratamento mais irrigado, em relação aos demais, houve resposta significativa sobre o peso de grãos por vagem, número de vagens por planta e de grãos por vagem.

McMASTER et alii (1965) e HORNER & MOJTEHEDI (1970), entre outros, verificaram as maiores reduções na produção quando o déficit de água no solo ocorria no florescimento e na frutificação.

Para MAGALHÃES & MILLAR (1978), houve decréscimo na produção de grãos com o número de dias de déficit de água a partir de uma semana antes do início da flora-

ção, com a diminuição do potencial matricial do solo. Antes e após o período desse déficit, os tratamentos foram efetuados em condições ótimas de umidade até o final do ciclo da cultura.

Segundo MILLAR & GARDNER (1972), o feijoeiro é afetado no crescimento e transpiração quando o potencial matricial é menor que $-0,025$ MPa, sofrendo a $-0,04$ MPa um decréscimo de 50% na taxa de transpiração.

De acordo com DAKER (1984), o nível de tensão da água no solo tolerado pelo feijoeiro para obter elevadas produções é de $0,06$ a $0,10$ MPa. BULISANI (1987), em São Paulo, propõe que se irrigue quando o solo atinge a tensão de $0,07$ MPa e que se tenha cuidado especial nas fases de germinação, crescimento vegetativo, florescimento e enchimento dos grãos, pois, caso ocorra déficit hídrico acentuado, as perdas de produção poderão ser elevadas e irrecuperáveis.

DOORENBOS & KASSAM (1979) recomendam que o suprimento de água para a máxima produção de feijão seja contínuo, desde o início do ciclo, suspendendo-se a irrigação cerca de 20-25 dias antes da colheita. A deficiência hídrica severa no período vegetativo geralmente retarda o desenvolvimento do ciclo da cultura, e irrigações frequentes durante o florescimento e maturação elevam bastante a produção. DOORENBOS & PRUITT (1977) apontaram o período crítico à deficiência hídrica da cultura do feijão da seguinte forma, por ordem de prioridade: (1) período de florescimento e pegamento das vagens; (2) período vegetativo e (3) período de maturação. Entretanto, o último pode ser mais crítico que o anterior, desde que não tenha ocorrido deficiência hídrica.

2.2. Balanço hídrico

Para a manutenção da umidade do solo em níveis ótimos de armazenamento, através da irrigação ou da drenagem, é necessário caracterizar o sistema solo-planta-atmosfera que interfere no balanço hídrico da cultura.

No estudo da determinação do consumo de água pelos vegetais em áreas irrigadas, destacam-se os métodos do balanço hídrico de campo e do balanço de energia.

2.2.1. Balanço hídrico de campo

O balanço hídrico de campo é um método para avaliar, em determinado período, os processos de fluxos de água em um solo, cultivado ou não (HILLEL, 1971). Seus componentes são os seguintes: precipitação, irrigação, escoamento superficial, drenagem profunda, evapotranspiração e variação do armazenamento de água no solo. Cada um deles é apresentado em forma integral ou diferencial, numa equação baseada no princípio da conservação da matéria (HILLEL, 1980, e OMETTO, 1981).

Na elaboração do balanço hídrico de campo, a maior dificuldade se encontra na estimativa da drenagem profunda obtida mediante a equação de Darcy. Muitas vezes, ela é negligenciada ou incluída como parte do armazenamento de água ou evapotranspiração da cultura (ROSE, 1966), embora, às vezes, seja responsável por grande parte da água perdida. Segundo REICHARDT et alii (1979), podem ocorrer erros na estimativa do gradiente do potencial hidráulico no solo, principalmente na determinação da condutividade hidráulica. Embora esta, quando obtida em laboratório, possa ser usada sem sérias restrições (DANG, 1980), a exponencialidade da relação entre a condutividade hidráulica e a umidade do solo em base volumétrica faz com

que um pequeno erro na estimativa da umidade possa resultar num valor da condutividade hidráulica de outra ordem de grandeza.

2.2.1.1. Drenagem profunda

O movimento de água no solo, que preferencialmente ocorre na fase líquida, dá-se em resposta a diferenças de potencial da água. Esse fluxo é igual ao produto da condutividade hidráulica pelo gradiente de potencial total, inicialmente determinado por Darcy em 1856. Assim, para o cálculo da drenagem profunda, é necessário a determinação de ambos na profundidade do sistema radicular.

A condutividade hidráulica, apesar de ser diretamente proporcional à umidade do solo, não implica que o fluxo também o seja. Os fluxos de água no campo ocorrem, na maioria das vezes, em condições insaturadas.

OGATA & RICHARDS (1957) determinaram a condutividade hidráulica no campo, através do perfil instantâneo em condições de não-saturação, modificando o método aplicado por RICHARDS et alii (1956), mediante a cobertura da superfície do solo, e eliminando, assim, o fluxo ascendente. NIELSEN et alii (1962) utilizaram-se da mesma técnica, exceto na determinação da umidade, onde empregaram sonda de nêutrons, técnica introduzida por BELCHER et alii (1950).

Através de medidas sucessivas do conteúdo e do gradiente de potencial da água de um perfil do solo, HILLEL et alii (1972) observaram uma relação exponencial entre a umidade volumétrica e a condutividade hidráulica.

Em vista das dificuldades envolvidas na determinação direta da condutividade hidráulica do solo, muitos pesquisadores procuram relacioná-la com outras propriedades físicas de fácil medida. No método proposto por REI-

CHARDT et alii (1975), é preciso conhecer apenas a umidade de saturação, a umidade seca ao ar e o coeficiente angular da curva da distância da fonte de água à frente de molhamento versus a raiz quadrada do tempo em experimentos de infiltração horizontal, em coluna de solo homogeneamente compactado em laboratório.

PAULA SOUZA et alii (1979) calcularam a drenagem profunda em terra roxa estruturada numa cultura de feijão, na profundidade de 120 cm, observando que no período úmido ela foi responsável por 58,7% da contabilidade da água e, no seco, por 6,6% apenas.

2.2.1.2. Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) de uma área cultivada consiste na evaporação do solo e transpiração pelas plantas, e varia com o estágio de desenvolvimento da cultura. Esses processos de evaporação e transpiração ocorrem simultânea e interdependentemente. A dificuldade em separá-los levou ao uso dos dois termos conjugados: evapotranspiração. A importância em conhecê-la é a estreita relação entre a transpiração e a produção de biomassa da planta (WIT, 1958). Essa dependência da produção final de biomassa e de grãos na evapotranspiração total das culturas também é relatada por DOWNEY (1972).

A estimativa da evapotranspiração é primordial na agricultura, sobretudo ao planejamento da irrigação, à predição de produtividade e ao manejo da disponibilidade dos recursos hídricos (HAGAN et alii, 1967, e DOORENBOS & KASSAM, 1979). Vários métodos foram desenvolvidos e técnicas introduzidas para a determinação da água consumida pelas plantas, com base em conceitos físicos de transporte de vapor d'água e nas respostas fisiológicas dos vegetais em experimentação.

Estudando a evapotranspiração do algodão e sorgo-granífero cultivados em lisímetros, RITCHIE et alii (1972) observaram que a taxa de transpiração diminuiu quando 80% da água extraível do perfil do solo foi usada. RITCHIE (1973) notou o mesmo efeito com milho, e MEYER & GREEN (1980) detectaram uma redução na taxa de transpiração quando 70-80% da água disponível era consumida em trigo.

MILLAR & GARDNER (1972) determinaram decréscimos curvilíneos na transpiração e na taxa de produção de matéria seca com o potencial de água do solo: quando este decrescia de $-0,028$ a $-0,04$ MPa, a produção de matéria seca diminuía em 47%. Determinaram, também, que o fechamento dos estômatos pelo déficit de água resultou em maior redução na taxa de crescimento do que na transpiração.

Para COWAN & MILTHORPE (1968) e KAUFMANN & HALL (1974), a taxa de perda de água através das plantas e os gradientes de potencial que geram o movimento da água são determinados, primariamente, pelos fatores atmosféricos e da planta que interferem na passagem do vapor d'água da folha para a atmosfera. Já para GARDNER (1965), a evapotranspiração em culturas sem deficiência hídrica é comandada muito mais pelas condições atmosféricas do que pelos fatores do solo e da planta, considerando que a radiação solar é a força motriz primária e que a taxa de escoamento da água depende do gradiente de pressão de vapor d'água entre a superfície evaporante e o ar.

SILVEIRA & STONE (1979) realizaram o balanço hídrico do feijoeiro em latossolo vermelho-amarelo em cerrado de Goiânia. Considerando um volume de controle com 60 cm de profundidade, encontraram 220 mm de evapotranspiração e 40 mm de drenagem profunda, ou equivalentes a 62 e 11% da evaporação do tanque classe A, acumulada ao longo do ciclo da cultura.

Em um experimento de três anos, na Costa Rica, GIRALT (1979) estimou a evapotranspiração total do feijoeiro em 360-371 mm, com média de 3,27-3,47 mm.dia⁻¹.

GUIMARÃES et alii (1982), avaliando a evapotranspiração, em Goiânia, de populações do feijoeiro, com e sem irrigação, obtiveram valores de evapotranspiração de 1,96 a 2,14 mm.dia⁻¹ nos primeiros dez dias após a germinação; 5,27 a 7,26 mm.dia⁻¹ no período da floração, e de 0,79 a 1,45 mm.dia⁻¹ no início da maturação.

2.2.1.2.1. Coeficiente de cultura

A relação entre a evapotranspiração real e a potencial ou de referência (E_{Tr}/E_{To}), denomina-se coeficiente de cultura (K_c) (DOORENBOS & PRUITT, 1977): trata-se de um coeficiente complexo que envolve variáveis relacionadas ao desenvolvimento da planta e ao manejo da água.

Em experimentação em terra roxa estruturada, em Piracicaba, LUCHIARI JUNIOR (1978) obteve K_c médio de 0,88, calculado pela estimativa da evapotranspiração real do feijoeiro, a partir da evaporação média diária corrigida do tanque classe A, para períodos de sete dias. Já DOORENBOS & KASSAM (1979) recomendam valores diferentes de K_c para diferentes estádios de desenvolvimento da cultura. No estágio 1, que vai da germinação até 10% de cobertura vegetal (15 a 20 dias) - K_c de 0,3 a 0,4; no estágio 2, de 10 a 80% de cobertura do solo pelas plantas (15 a 20 dias) - K_c de 0,7 a 0,8; no estágio 3, de 80% de cobertura vegetal até o início do amadurecimento (35 a 45 dias) - K_c de 1,05 a 1,2; no estágio 4, do amadurecimento até a colheita (20 a 25 dias) - K_c de 0,65 a 0,75, e no estágio 5, período da colheita - K_c de 0,25 a 0,30.

ENCARNAÇÃO (1980), comparando os métodos de determinação do Kc em feijoeiro cultivar Goiano Precoce em terra roxa estruturada, em Piracicaba, concluiu que a estimativa de Kc através do tanque classe A foi a única que não diferiu estatisticamente do padrão recomendado pela FAO (DOORENBOS & KASSAM, 1979).

SANTOS (1985) comparou os valores medidos de ET com o calculado pelo método da radiação da FAO (Makkink modificado) recomendado por DOORENBOS & PRUITT (1977), obtendo os seguintes resultados de Kc: período de 28.1 (germinação) a 6.2: 0,20; de 7 a 16.2: 0,67; de 17 a 26.2: 0,89; de 27.2 a 7.3: 1,43; de 8 a 17.3: 0,75; de 18 a 27.3: 0,99; de 28.3 a 3.4: 0,73; de 4 a 11.4: 0,15. O Kc médio foi de 0,73.

Os resultados de Kc relatados na literatura variam. Nem sempre são bem caracterizadas as condições ambientais onde foram determinados, resultando, muitas vezes, em valores discrepantes entre locais, épocas e autores.

Quando se tem um controle maior das condições que interferem no consumo de água, é importante a comparação do Kc obtido a partir do balanço hídrico de campo com o do balanço de energia diário ou pela equação de Penman.

2.3. Balanço de energia

O balanço de energia é o somatório algébrico das energias que alcançam e deixam a superfície do solo, vegetada ou não, tendo como resultante a energia líquida disponível ao meio. É utilizado no cálculo da evapotranspiração: os resultados obtidos por esse método são semelhantes àqueles por lisímetro, porém sem seus gastos. Segundo PERRIER et alii (1975), ele é adotado para determinar os fluxos de calor latente e sensível, a partir de me-

das da radiação líquida, do fluxo de calor no solo, dos gradientes de vapor d'água e da temperatura do ar acima da cultura. Agronomicamente, é utilizado para quantificar o consumo d'água pela cultura (evapotranspiração), com grande precisão, quando não há transporte advectivo. Na classificação de TANNER (1968), o método do balanço de energia se destina à determinação horária.

Alguns autores observaram que, em condições advectivas, o emprego do método é dificultado pela contribuição de energia no processo evaporativo, além daquelas determinadas no balanço vertical. No sorgo, por exemplo, HANKS et alii (1971) detectaram um incremento de até 30% na evapotranspiração, e CHIN CHOY & KANEMASU (1974) observaram que 21% da energia utilizada na transpiração era proveniente da advecção.

No Brasil, a técnica do balanço de energia foi adotada por alguns autores, como VILLA NOVA (1973) na cultura do arroz; PEDRO JR. (1977), na de soja, e BERGAMASCHI (1984), na do feijão.

O consumo total de água da cultura sob vários tratamentos de manejo de irrigação pode ser mais bem entendido pela análise do curso diário da partição da energia e no seu uso para a vaporização da água do solo e da planta.

*2.3.1. Resistência da planta ao fluxo transpiratório

O movimento de água a partir do solo para a atmosfera, através da planta, é um processo contínuo e dinâmico que se dá ao longo de gradientes decrescentes de potencial d'água (GARDNER, 1960). A planta absorve água armazenada no solo em resposta a um gradiente de potencial da água no sistema solo-planta (GARDNER & NIEMANN, 1964, e RITCHIE, 1974). Esse gradiente resulta da transpiração,

que desidrata as folhas, reduzindo o potencial da água na planta, em um processo essencialmente passivo. Com isso, as taxas de fluxo de água do solo, através das raízes, para as folhas, é proporcional à diferença entre os potenciais da água na folha e no solo (RITCHIE, 1974).

A água se move no sistema solo-planta-atmosfera, passivamente, segundo um gradiente de potencial. Quanto maior o gradiente, mais rapidamente ela se moverá. Esse movimento, todavia, é influenciado também pela resistência do percurso (HSIAO, 1973, e NOBEL, 1974).

O movimento da água da raiz até as folhas, que ocorre, predominantemente, no xilema, é chamado fluxo transpiratório: por via de regra, é causado pela perda de água através da folha, mas pode ser aumentado pela pressão radicular resultante de solutos no xilema das raízes. A principal força motriz está localizada fora, e não dentro da planta, embora forças osmóticas sejam responsáveis pelo acúmulo de água nas células (SUTCLIFFE, 1980). Portanto, para manter o fluxo, o potencial da água na planta deve ser menor do que no solo (MILLAR et alii, 1971).

Segundo JARVIS (1975), para uma planta cujo déficit hídrico se está desenvolvendo, a transpiração excede a absorção, e a água é retirada dos tecidos que circundam o xilema. Quando a transpiração se iguala à absorção, observa-se que a água nos tecidos que envolvem o xilema e a do próprio xilema estão sob o mesmo potencial. Como o volume de água transpirada diariamente é grande em relação à variação do seu teor na planta, o fluxo de água pode, para determinados intervalos de tempo, ser considerado como um processo em equilíbrio dinâmico.

A resistência da planta ao fluxo d'água é definida como a resistência ao fluxo líquido através de raízes, xilema e folhas (JONES et alii, 1982).

Para solos úmidos, tanto a resistência total como a da planta podem ser consideradas iguais, ou seja, o solo pouco contribui para a resistência total. No entanto, com o secamento do solo, a resistência total torna-se consideravelmente maior que a da planta, para os mesmos valores de fluxo transpiratório (ZUR et alii, 1982).

No que se refere à resistência do solo ao movimento da água, vários autores afirmam que a condutância do solo decresce exponencialmente com o decréscimo do teor da água (GARDNER, 1960; HSIAO et alii, 1979; LIBARDI et alii, 1980, e BRUNINI, 1981).

A transpiração das plantas envolve a evaporação da água a partir de locais dentro das folhas ou outros tecidos e seu subsequente transporte como vapor d'água, principalmente por difusão, através de uma série de resistências, até o ar externo. A maior parte do fluxo total ocorre pelos estômatos, e pequena porção pela cutícula (JONES & HIGGS, 1980).

Segundo GATES (1980), usando a lei de Fick, é possível definir a resistência à difusão para os percursos estomático, cuticular e da camada limite. A resistência total deste percurso representa a soma das resistências da folha e da camada limite, considerando que existem duas superfícies foliares e que a difusão do vapor d'água de ambas representa um circuito em paralelo.

A resistência do ar à troca gasosa varia com as dimensões da folha e com a ventilação: aumenta com o tamanho das folhas e diminui com a velocidade do vento, sendo esta última a variável que mais a afeta (PARCEVAUX, 1972; ROSEMBERG, 1974, e GATES, 1980).

A abertura dos estômatos e, portanto, a resistência que opõem ao fluxo de vapor d'água é função de fatores internos e externos à folha, passíveis de medir por aparelhos próprios, possibilitando a descrição do comportamento estomático e o estado hídrico da planta (BEGG &

TURNER, 1976; JARVIS, 1976; GATES, 1980). Segundo GARDNER (1960), o decréscimo do conteúdo de água no solo diminui o potencial da água no solo e nas folhas, que apresentam um déficit: as células-guarda perdem a turgescência, causando o fechamento dos estômatos e, conseqüentemente, aumentando a resistência ao transporte de vapor d'água nas folhas. Esse aumento na resistência estomática ocasiona a redução da dissipação do calor latente pela transpiração, elevando, por conseguinte, a temperatura das folhas (BIDINGER, 1978). SLATYER (1967), complementando essa afirmação, acrescenta que a temperatura, a luz e a concentração de CO_2 no ar ambiente também afetam a pressão de turgescência das células-guarda. KANEMASU & TANNER (1969) concluíram que a resistência estomática, que é a principal resistência à difusão do vapor d'água, age como uma chave interruptora, evitando uma diminuição mais intensa no potencial da água na folha. Quando as plantas são submetidas a déficits hídricos graduais, podem ocorrer processos que as tornam menos sensíveis ao estresse de água por ajustamento osmótico, por influência na morfologia das folhas e por mudanças na plasticidade das suas células (JENSEN, 1981).

A abertura estomática também depende de processos fotoquímicos, sendo uma função da densidade de fluxo quântico, da diferença de pressão de vapor folha-ar, da temperatura da folha, do nível de CO_2 , da velocidade do vento e do estado hídrico da folha (JARVIS, 1976; KAUFMANN, 1976, e SIVAKUMAR & SHAW, 1979).

KANEMASU & TANNER (1969) mediram a resistência estomática abaxial e adaxial e o potencial da água nas folhas expandidas do feijoeiro em condições de campo: observaram eles comportamentos distintos entre as faces das folhas, provavelmente pelo maior número de estômatos na superfície abaxial. Enquanto essa face não era afetada significativamente, pela mudança do potencial da água na folha de 0 a $-1,1$ MPa, só aumentando rapidamente com o in-

cremento do potencial de $-1,1$ para $-1,2$ MPa, na face adaxial esse aumento na resistência ocorreu gradativamente a partir de $-0,8$ até $-1,2$ MPa. MILLAR & GARDNER (1972) observaram elevação na resistência estomática adaxial à difusão de vapor a um potencial da água na folha menor que $-0,8$ MPa. Coincidentemente, detectaram diminuição mais rápida na taxa de produção de matéria seca que na de transpiração quando esse nível foi alcançado.

Um aumento nos valores da resistência estomática com a diminuição da disponibilidade hídrica no solo, foi observado por HSIAO (1973). Esse efeito, mais pronunciado quando o conteúdo de água no solo era inferior a 80% da água disponível, levou-o a concluir que a determinação da resistência do estômato à difusão de vapor é um excelente critério para a estimativa do déficit hídrico na produtividade das plantas.

BASCUR et alii (1985) demonstraram a possibilidade de, por meio da termometria infravermelha e de um índice de secamento que representa o estado hídrico da planta, identificar cultivares de feijão com genótipo para maior tolerância à deficiência hídrica. KRETCHMER et alii (1980), por sua vez, utilizaram a diferença acumulada da temperatura do dossel aferida em torno das 13h, entre parcelas irrigadas e não-irrigadas, para identificar genótipos de feijão-tolerantes à seca.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

3.1.1. Local

O experimento foi realizado no Centro Experimental de Campinas - Instituto Agronômico do Estado de São Paulo (IAC), cujas coordenadas são 22°53' S. e 47°04' W., e altitude de 706 metros, em área aproximada de 18.000 metros quadrados.

3.1.2. Clima

O clima regional é do tipo "CWA", conforme classificação de Koppen, definido como inverno seco e temperatura do mês mais quente superior a 22° e do mês mais frio inferior a 18°C. Os valores normais de precipitação anual são de 1.365 mm, evapotranspiração potencial anual, de 955 mm, com excedente hídrico de 433 mm, e deficiência hídrica de 23 mm, obtidos pelo balanço hídrico de THORNTHWAITE & MATTER (1955), considerando-se um armazenamento de 125 mm de água no solo (dados fornecidos pela Seção de Climatologia Agrícola do IAC).

3.1.3. Solo

O solo foi classificado como latossolo roxo eutrófico, argiloso, localizado em relevo plano a suave ondulado, com declividade do terreno na área experimental inferior a 2%.

3.1.3.1. Textura

Determinou-se a textura através da análise granulométrica, pelo método da pipeta na quantificação do teor de argila; tamisamento para a separação da fração areia e, por diferença, o teor de silte, após dispersão da terra fina seca ao ar (TFSA) com hidróxido de sódio e agitação mecânica. Os resultados da análise granulométrica, média de quatro perfis, encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados de análise granulométrica, fracionamento segundo escala de Atterberg, do latossolo roxo eutrófico, Campinas, realizada pela Seção de Pedologia do IAC.

Profundidade	Areia		Silte	Argila
	Grossa	Fina		
cm	%			
0-20	21	18	05	56
20-40	18	15	06	61
40-60	17	12	06	65
60-80	16	13	06	65
80-100	16	13	07	64

3.1.3.2. Densidade e porosidade do solo

Determinou-se a densidade global do solo a cada 10 cm, até a profundidade de 50 cm, utilizando-se amostras indeformadas coletadas em anéis volumétricos de 100 cm³, e, nas mesmas profundidades, estabeleceu-se a densidade da partícula pelo método do picnômetro.

A porosidade total foi estimada pela relação entre a densidade do solo e a da partícula:

$$\text{Espaço poroso (\%)} = 100 - \frac{\text{densidade do solo}}{\text{densidade da partícula}} \times 100 \quad (1)$$

Essas densidades foram determinadas na Seção de Irrigação e Drenagem do IAC, encontrando-se os resultados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados da densidade global e da partícula e porosidade total do solo, ao longo do perfil do latossolo roxo eutrófico, na área experimental. Cada valor é média de oito repetições.

Profundidade	Densidade		Porosidade
	Global	Partícula	
cm	g.cm-3		%
10	1,24	2,61	52,7
20	1,30	...	...
30	1,33	2,65	50,4
40	1,27	...	...
50	1,21	2,65	54,5

3.1.3.3. Velocidade de infiltração da água no solo

Determinou-se a velocidade de infiltração da água no solo pelo infiltrômetro de anéis concêntricos, utilizando-se dois deles de 30 e 60 cm de diâmetro, em sete repetições. Após encravados ao solo, esses anéis foram alimentados e mantidos com uma lâmina constante de água de 4 cm, por um sistema de válvulas bóias conectadas a cilindros reservatórios, onde se efetuaram as leituras do volume infiltrado no solo, em função do tempo, em períodos variáveis, de acordo com a velocidade com que a água penetrava no solo, porém os mesmos para cada local, até estabilizar-se, admitindo um valor constante, denominado infiltração básica (K_0).

Os resultados médios obtidos encontram-se na Figura 1. A infiltração básica (K_0) observada foi de $3,60 \text{ cm.h}^{-1}$ ou $36,0 \text{ mm.h}^{-1}$.

3.1.3.4. Curva de retenção da água

Determinou-se a curva característica de umidade de solo mediante extratores de placa porosa.

As amostras da camada superficial de 0-5 cm, de vários locais na área de ensaio, foram preparadas em laboratório, passando em peneiras de 2 mm e as de 20, 40 e 60 cm de profundidade eram indeformadas e coletadas em anéis volumétricos de 100 cm^3 .

As amostras foram submetidas às pressões de 0,1 a 15,0 atm, na panela e na câmara de Richards, com três repetições para cada profundidade, podendo, assim, determinar-se a dependência entre a umidade do solo e o potencial matricial. Os resultados das características de retenção da água no solo, para a camada de 0-60 cm, acham-se na Figura 2.

Figura 1 - Velocidade de infiltração e infiltração acumulada em função do tempo, observada na área experimental, pelo método dos anéis concêntricos.

Figura 2 - Curva característica da água no solo, obtida em laboratório, para a camada 0-60 cm da área experimental.

3.1.3.5. Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica do solo (K), em função de sua umidade (θ) foi determinada em laboratório, com base na análise de infiltração horizontal da água em coluna de solo, no Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ.

Uma coluna, constituída de um tubo de acrílico de 30 cm de comprimento e 5,7 cm de diâmetro interno, ligada em uma das extremidades a um reservatório de água de nível constante, foi preenchida com amostra de TFSA de diâmetro inferior a 1 mm e compactada homogeneamente até a densidade observada no campo.

A análise do processo de infiltração da água no solo, neste método, consiste na determinação do avanço da frente de molhamento no tempo, a qual é proporcional à raiz quadrada do tempo. Esses valores são dispostos em um sistema de eixos cartesianos, onde é graficamente determinada a tangente formada pela reta que une esses pontos e o tempo de observação. Como valor da tangente, a condutividade da água no solo foi determinada a partir da expressão proposta por REICHARDT & LIBARDI (1973), a saber:

$$K(w) = 1,942 \times 10^{-12} \times m^4 e^{(-12,235w^2 + 28,061w)} \quad (2)$$

onde m é a inclinação da reta formada pela frente de molhamento e a raiz quadrada do tempo, e w , uma unidade adimensional dada pela relação:

$$w = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0} \quad (3)$$

sendo θ a umidade volumétrica do solo para um instante qualquer, e θ_0 e θ_s , respectivamente, as umidades do solo seco ao ar (TFSA) e, do solo saturado.

Inicialmente, determinou-se a umidade da amostra de solo com três repetições, obtendo-se o valor médio de $0,022 \text{ g.g}^{-1}$. A partir dele, calculou-se a umidade volumétrica, seguida da compactação homogênea da coluna de solo, obtendo-se uma densidade global de $1,285 \text{ g.cm}^{-3}$ na coluna, semelhante à do campo.

Na Figura 3 - resultados da infiltração horizontal - observa-se a relação linear entre o caminhamento da frente em função da raiz quadrada do tempo decorrido de infiltração ($R^2 = 0,999$).

Após a infiltração, desmontou-se a coluna e determinou-se a umidade do solo sob condições de saturação (0-2 cm da coluna), obtendo-se o índice $0,445 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

Para o cálculo da condutividade hidráulica do solo em função de sua umidade, $K(\theta)$, basta obter o valor de W correspondente ao de θ desejado pela eq.(3) e aplicar na eq.(2), apresentando os resultados em cm.s^{-1} .

Variando a umidade volumétrica do solo entre a saturação e a da amostra seca ao ar, obtém-se o gráfico semilogarítmico da condutividade hidráulica em função da umidade, com os resultados expressos em cm.dia^{-1} - Figura 4.

3.2. Esquema experimental

A Figura 5 mostra a disposição esquemática do campo experimental e das parcelas onde se fizeram as medições necessárias ao cálculo do balanço hídrico e de energia.

Dada a impossibilidade de efetuar estudos de balanço de energia em áreas reduzidas, sem incorrer em problemas de efeitos de bordadura, e considerando que tratamentos de irrigações em grandes áreas incorreriam em di-

ficuldades de equipamento e interferência da precipitação natural, optou-se por dividir o ensaio em dois tipos de parcela.

O estudo de irrigação consistiria em parcelas menores, para melhor controle da aplicação de água e proteção contra a precipitação natural. De acordo com a frequência de irrigação e disponibilidade hídrica no solo, os tratamentos foram os seguintes:

- a: déficit hídrico natural (DHN);
- b: sem déficit hídrico (100%AD);
- c: déficit hídrico leve (75%AD);
- d: déficit hídrico moderado (50%AD);
- e: déficit hídrico acentuado (25%AD), e
- f: déficit hídrico severo (DHI).

O estudo de balanço de energia foi realizado em parcelas maiores, cerca de 7.000 m² cada uma, com os seguintes tratamentos:

- g: similar ao 50%AD (M50%), e
- h: similar ao 75%AD (M75%).

A manutenção do armazenamento de água no solo, nos níveis estipulados nos tratamentos a a f, foi feita por um sistema de irrigação por microaspersão e, nos tratamentos g e h, por um sistema convencional por aspersão. Efetuou-se o controle das irrigações por amostragens gravimétricas do solo, sistematicamente, e verificando-as pela evaporação de um tanque classe A dentro da área da cultura.

O tratamento DHN foi executado sem cobertura plástica, similar às condições normais de lavoura comercial, em que o estresse se desenvolve naturalmente e as irrigações são realizadas quando as plantas apresentam visível sintoma de sua necessidade.

Figura 3 - Infiltração horizontal da água no solo para a camada 0-30cm, em função da raiz quadrada do tempo, na área experimental.

Figura 4 - Condutividade hidráulica em função da umidade do solo, determinada em laboratório, a partir da infiltração horizontal da água em coluna de solo.

M_a = Mastro do perfil de vento.

M3 e M4 = Mastros do balanço de energia.

LAB. = Laboratório

Figura 5 - Representação esquemática da área experimental com feijão: localizações dos mastros (M), com instrumental micrometeorológico, o laboratório, com o sistema de aquisição de dados, e a área com seis blocos de tratamentos de irrigação (25 a 100%AD, DHI e DHN).

A imposição do déficit hídrico no tratamento DHI refere-se à suspensão das irrigações e controle das precipitações até o aparecimento de sintomas visíveis de estresse hídrico no meio do dia. Nesse ponto, era realizada a irrigação, deixando-se a seguir a repetição de novo ciclo de déficit seguido de nova aplicação de água.

A proteção das parcelas contra eventuais precipitações e influência da irrigação geral do campo foi feita por uma cobertura plástica de 3 x 6 m, esquematicamente apresentada na Figura 6.

3.3. Características da cultura

Plantou-se o cultivar Carioca-80-SH, recomendado para o Estado de São Paulo, a 8 de julho de 1986, em toda a área experimental de 1,8 ha, no espaçamento entre linhas de 50 cm e doze a treze sementes por metro linear. Para garantir o estabelecimento da cultura, efetuou-se, antes e depois do plantio, uma irrigação de 30 mm.

Realizou-se a adubação na semeadura, com 300 kg/ha da fórmula 4-22-12, complementando-a com 150 kg/ha de sulfato de amônio, 25 dias após a germinação.

A emergência ocorreu em 17 de julho e o encerramento das análises microclimáticas em 13 de outubro, com colheita do ensaio em 20-21 de outubro. Nesse período, executaram-se duas capinas mecânicas, complementadas manualmente nas áreas de maior incidência de ervas daninhas, e controle semanal de saúvas.

1. VISTA LATERAL

2. VISTA FRONTAL

3. VISTA ESPACIAL

Figura 6 - Esquema da armação de suporte para a proteção de parcelas contra as precipitações, instalada nos tratamento de irrigação.

3.4. Instrumental

O instrumental micrometeorológico foi instalado em diferentes pontos do campo, em mastros para avaliação da radiação, do perfil de vento e dos gradientes de temperatura e umidade do ar.

3.4.1. Anemômetro

O perfil da velocidade do vento acima da cultura foi determinado com anemômetros tipo caneca, montados no mastro a 0,80, 1,40, 2,40, 3,35, 4,50 e 6,05 m do nível do solo, foram obtidos valores médios horários da velocidade horizontal do vento.

3.4.2. Temperatura do ar e abrigo termométrico seco e úmido

A temperatura do ar foi determinada através de termopares de cobre constantã número 24 AGW, instalados em mastros nas duas áreas maiores e nos tratamentos extremos de armazenamento de água no solo, seus valores sendo integrados e registrados a intervalos de 150 segundos.

Esses termopares, instalados à altura do dossel e a 50, 100 e 150 cm acima, serviram para determinar os gradientes de temperatura seco e úmido, necessários ao cálculo do balanço de energia.

As partes sensíveis (junção de medida) foram colocadas no interior de abrigos micrometeorológicos especiais, evitando a exposição direta da radiação solar. Esses microabrigos são semelhantes aos utilizados no Brasil por PEDRO JR. (1977) e BERGAMASCHI (1984). As junções de referências foram colocadas em gelo fundente (0°C) e avaliadas periodicamente.

3.4.3. Radiômetro líquido

Para as determinações do fluxo de radiação líquida, empregaram-se radiômetros líquidos, com modificações semelhantes às usadas por LOURENCE et alii (1970): inflando a cúpula plástica do radiômetro por uma bomba de aquário e passando o fluxo de ar por um dessecador. A constante de resposta do radiômetro é de $30,85 \pm 2,5\%$ mV. cal.cm⁻².min⁻¹.

Os aparelhos foram mantidos a 1,50 m de altura acima do topo do cultivo, nos tratamentos M50% e M75%.

3.4.4. Radiação global

A radiação global foi medida por radiômetros instalados a 1,5 m de altura do dossel, acoplados a um potenciômetro.

3.4.5. Radiação fotossinteticamente ativa

Mediu-se a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) com um sensor quântico pontual, acoplado ao porômetro: este mede o quantum de fótons em $\mu\text{E.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ na faixa de 400-700 nm, com resolução de 5%.

3.4.6. Placas medidoras do fluxo de calor no solo

Mediu-se o fluxo de calor no solo por quatro placas de fluxo montadas a 5 cm de profundidade, na projeção do radiômetro líquido, e posicionadas nas linhas e nas entrelinhas da cultura. Essas placas, de $1\frac{7}{8} \times 1\frac{1}{8} \times \frac{3}{16}$ ", apresentaram as seguintes respostas:

- .F-253 - $18,74 \pm 3\%$ mV/cal.cm⁻².min⁻¹;
- .F-223 - $18,91 \pm 3\%$ mV/cal.cm⁻².min⁻¹;
- .F-247 - $19,05 \pm 3\%$ mV/cal.cm⁻².min⁻¹;
- .F-225 - $18,36 \pm 3\%$ mV/cal.cm⁻².min⁻¹.

As placas foram ligadas em paralelo e conectadas ao sistema de aquisição de dados. A resposta média do conjunto foi de $18,76 \pm 3\%$ mV/cal.cm⁻².min⁻¹.

3.4.7. Sistema de aquisição de dados

O sistema foi projetado e construído na Seção de Climatologia Agrícola do IAC, para o presente experimento, e sua capacidade padrão, projetada para 40 canais, com duas faixas de tensão: 2 e 50 mV.

Ele possibilita atender às necessidades de monitorar os sensores meteorológicos, registrando os impulsos numa impressora ou num registrador gráfico, continuamente, com valores médios integrados a períodos desejados.

3.4.8. Porômetro

Foi utilizado um porômetro de equilíbrio dinâmico, onde a resistência estomática é obtida diretamente, medindo a taxa de transpiração em equilíbrio de uma folha dentro de uma câmara. Em sua constituição, há um termopar de crômél-constantã para a leitura da temperatura de folha, em ambas as faces.

3.4.9. Evaporação

Determinou-se a evaporação pelo tanque classe A modificado (AMORIM NETO & VILLA NOVA, 1983), de nível de água constante, instalado em superfície gramada próxima à área experimental.

3.5. Balanço hídrico

Avaliou-se o consumo de água pela cultura através do balanço hídrico de campo.

A equação do balanço hídrico de uma camada de solo de profundidade Z num intervalo de tempo $t_2 - t_1$, fundamenta-se no princípio da conservação de massa:

$$\int_{t_1}^{t_2} (P + I - ETr \pm D \pm R) dt = \int_0^Z \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial \theta}{\partial t} dt.dz \quad (4)$$

onde P , I , ETr , D e R representam, respectivamente, os fluxos de precipitação, irrigação, evapotranspiração, drenagem profunda e deflúvio superficial, (mm.dia^{-1}); e θ representa a unidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$). O segundo membro da equação corresponde à variação no armazenamento da água na camada de solo de profundidade Z num período de tempo $t = (t_2 - t_1)$.

Essa mesma equação pode ser escrita de maneira mais simplificada, integrando-a com relação ao tempo e à profundidade:

$$P + I - ETr \pm D \pm R \pm \Delta A = 0 \quad (5)$$

onde ΔA representa a variação no armazenamento de água no solo (mm).

O deflúvio superficial não foi considerado na análise dos componentes do balanço hídrico. Isso é possível pelos seguintes fatores: pouca declividade do terreno (menor de 2%); armazenamento de água na superfície pelos sulcos de plantio, e alta velocidade de infiltração do solo ($k_0 = 36 \text{ mm.h}^{-1}$, Figura 1), associados à precipitações pouco intensas. Assim, a expressão utilizada para a determinação da evapotranspiração foi:

$$\text{ETR} = P + I \pm D \pm \Delta A \quad (6)$$

Na avaliação dos componentes do balanço hídrico, considerou-se um volume de controle de profundidade igual a 40 cm, em virtude da maior concentração do sistema radicular ficar nos primeiros 30cm (INFORZATO & MIYASAKA, 1963).

* 3.5.1. Variação no armazenamento de água no solo

A variação no armazenamento de água no solo foi estimada a partir de perfis consecutivos de umidade em volume (θ), obtidos em dias alternados.

Para a determinação de θ , empregou-se o método gravimétrico, através de amostras coletadas com trado nas profundidades de 0-5, 5-20, 20-40 e 40-60 cm, com duas repetições por parcela. As amostras eram acondicionadas em latas de alumínio e secas em estufa a 105°C por 48 horas. Para a estimativa do armazenamento no solo (A), foi empregada a expressão:

$$A = \theta \cdot Z \quad (7)$$

onde θ é a umidade média do perfil do solo até a profundidade Z, igual a 40 cm.

A variação nesse armazenamento (ΔA) num período $t_2 - t_1$ foi determinada por:

$$\Delta A = A_2 - A_1 \quad (8)$$

onde A_2 e A_1 são os armazenamentos de água no solo (mm) nos tempos considerados.

3.5.2. Precipitação pluvial e irrigação

A precipitação pluvial foi obtida com dados diários observados em pluviômetros junto à cultura.

As irrigações foram realizadas por meio de aspersores instalados na área, no espaçamento de 12 x 12 m e, a vazão, foi medida com hidrômetro na linha mestre do encanamento. Nos tratamentos específicos de balanço hídrico, efetuaram-se as irrigações com microaspersores, no espaçamento de 1,20 x 1,15 m. As lâminas foram determinadas por pluviômetros, dentro da cultura.

3.5.3. Drenagem profunda

Determinou-se o fluxo vertical de água no solo, na profundidade Z de 40 cm (q_z), pela equação de Darcy:

$$q_z = -K(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (9)$$

onde $\frac{\partial \Psi}{\partial z}$ é o gradiente potencial hidráulico (matricial + gravitacional), e $K(\theta)$, é a condutividade hidráulica como uma função de θ .

O potencial matricial e a condutividade hidráulica de cada camada foram calculados a partir da medição da umidade do solo e da curva característica (Figura 2) e da relação $K(\theta)$ da Figura 4.

Para cada intervalo de retirada de amostra, determinou-se um valor médio da condutividade hidráulica, de modo que:

$$K = \frac{K(\theta_1) + K(\theta_2)}{2} \quad (10)$$

onde, $K(\theta_1)$ e $K(\theta_2)$ foram obtidas através das unidades volumétricas θ_1 e θ_2 , que correspondem a valores médios de umidade no perfil do solo, para cada amostragem.

A drenagem total em determinado período foi calculada por:

$$D = qz \cdot \Delta t \quad (11)$$

onde D é a drenagem total no período (mm); qz , o fluxo de água na profundidade de 40 cm (mm.dia^{-1}), e Δt , o intervalo em dias entre duas amostragens.

3.5.4. Evapotranspiração

Estimou-se a evapotranspiração potencial (ET_0), (mm.dia^{-1}), pelos resultados da evaporação do tanque classe A (ECA), pela relação:

$$ET_0 = ECA \cdot K_p \quad (12)$$

onde ECA é a evaporação do tanque Classe A (mm.dia^{-1}), representada pelo valor médio diário do período considerado, e K_p , é o coeficiente do tanque, variável em função da umidade relativa do ar, da velocidade do vento junto ao

tanque e da sua localização. Para facilidade da contabilidade da ET_0 , adotou-se um valor médio para o K_p de 0,8 durante todo o ciclo da cultura.

Calculou-se a evapotranspiração real (E_{Tr}) dos tratamentos submetidos ao balanço hídrico de campo, pela expressão 6, isto é, pela diferença entre a variação do armazenamento da água e as adições e/ou subtrações observadas em cada período: precipitações, irrigações, drenagem profunda. Nesse estudo, a duração de cada período foi de quatro dias, ao longo do ciclo da cultura, enquanto a evapotranspiração real calculada pelo método do balanço de energia foi diária e obtida através da razão de Bowen (β), (ver item 3.6).

Portanto, a comparação entre a evapotranspiração diária, calculada pelos dois métodos, pode resultar em valores bastante diferentes, pelo amaciamento dos resultados do balanço hídrico.

3.6. Coeficiente de cultura

A quantidade de água necessária à cultura, e que se pode aplicar na forma de irrigação, foi calculada, estimando-se a evapotranspiração potencial de referência e multiplicando-a por um fator (K_c), que representa a demanda ideal.

Esse coeficiente é obtido pela relação:

$$K_c = \frac{E_{Tr}}{ET_0} \quad (13)$$

onde E_{Tr} é a evapotranspiração real medida no tratamento de irrigação e ET_0 , a evapotranspiração potencial ou de referência, que depende exclusivamente das condições climáticas.

Vários métodos podem ser adotados na sua determinação: no presente estudo, eles foram estimados indiretamente pela evaporação do tanque classe A e pelo balanço de energia.

3.7. Balanço de energia

O método utilizado neste trabalho para analisar a energia colocada à disposição da cultura foi o balanço de energia. Essa técnica quantifica os fluxos energéticos verticais incidentes e emergentes sobre o dossel, apresentando facilidade na execução e, segundo TANNER (1968), não há perda de detalhes significativos.

O balanço de energia consistiu nas medições diretas da radiação líquida (RN) e do fluxo de calor no solo (G); através do gradiente de concentração de vapor d'água e da temperatura do ar acima do topo da cultura, determinou-se o fluxo de calor latente (LE) e sensível (H), de acordo com o modelo utilizado por TANNER (1968) e VILLA NOVA et alii (1975):

$$RN + G + LE + H + P = 0 \quad (14)$$

onde RN é a radiação líquida disponível à superfície; G, fluxo de calor para o solo; LE, fluxo convectivo de calor latente; H, fluxo convectivo de calor sensível, e P, energia utilizada nos processos fotossintéticos, todos em $\text{cal. cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$.

Segundo VILLA NOVA et alii (1975), a energia utilizada nos processos fotossintéticos (P) raramente é superior a 2-5% da radiação líquida, podendo ser desprezada sem causar erros significativos.

Assim, a equação do balanço de energia passa a:

$$RN + G + LE + H = 0 \quad (15)$$

Essa equação pode ser resolvida de maneira mais simples, segundo BOWEN (1926), que definiu a relação (razão de Bowen) entre os fluxos H e LE de tal modo que:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{1}{\frac{(S + \gamma)}{\gamma} \frac{(\Delta TU)}{\Delta T} - 1} \quad (17)$$

onde γ é a constante psicrométrica; S, a derivada da tensão de vapor em relação à temperatura; ΔTU , a diferença de temperatura de bulbo úmido entre dois níveis; ΔT , a diferença da temperatura do bulbo seco entre dois níveis.

Inicialmente, calcula-se a razão de Bowen, obtendo-se os valores de LE e H, e, substituindo-se a eq. 16 em 17 :

$$LE = - \frac{RN + G}{1 + \beta} \quad (18)$$

As eq. (16), (17) e (18), que constituem a formação do método do balanço de energia, permitem estimar os fluxos turbulentos de calor latente e de calor sensível sobre uma superfície natural evaporante.

3.8. Aspectos fisiológicos da cultura

3.8.1. Resistência estomática à difusão de vapor d'água, temperatura e transpiração foliar

Para caracterizar o comportamento fisiológico do feijoeiro, efetuaram-se amostragens sazonais da resistência estomática nas parcelas experimentais, nos dias 4, 8, 10, 11, 16 e 23 de setembro.

Essas medidas foram feitas nos primeiros folíolos totalmente expandidos da planta, na superfície adaxial e abaxial, ao acaso, em dez plantas por parcela, para garantir a representatividade dos dados.

Tais parâmetros foram avaliados através de um porômetro, que mede diretamente a resistência estomática, sem necessidade de curvas de calibração: mede a taxa de transpiração em equilíbrio dinâmico de uma folha dentro de uma câmara, mantendo-se constante a densidade de vapor d'água. Isso é alcançado pelo bombeamento de ar seco da câmara, resultando num balanço entre o fluxo de água transpirada pela folha e o fluxo de ar úmido saindo da câmara.

Mediu-se a temperatura da folha por um termopar de crômel-constantã em contato com a folha.

A resistência estomática total (r_{st}) foi estimada, admitindo que as duas superfícies da folha atuem como resistores em paralelo (TURNER & BEGG, 1973, e MONTEITH, 1975), assim:

$$r_{st} = \frac{r_{sad} \cdot r_{sab}}{r_{sad} + r_{sab}} \quad (19)$$

onde r_{sad} e r_{sab} são resistências, respectivamente, da superfície adaxial e abaxial da folha.

3.8.2. Eficiência no uso da água

Para a produção final de grãos a 13% de umidade, determinou-se a eficiência no uso da água (EUA), pela relação entre o peso de grãos (kg.ha^{-1}) e o consumo de água (mm), transformando-se o resultado em $\text{g.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$.

A colheita foi realizada aos 95 dias após a germinação, em todas as parcelas, embora tenham ocorrido variações no grau de maturação entre tratamentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Irrigações

As irrigações foram realizadas de acordo com as condições de umidade observadas no solo e grau admissível de secamento programado para cada tratamento. Antes do preparo do solo e logo após o plantio, efetuaram-se irrigações gerais no ensaio, suficientes para elevar a umidade do solo à capacidade de campo e garantir o bom estabelecimento da cultura.

A Figura 7 apresenta as irrigações e precipitações durante a condução do ensaio. Aos 25 dias após a germinação (DAG), irrigaram-se todos os tratamentos, cuja diferenciação a ocorrência natural de chuvas até os 40 DAG não permitiu. Por essa época, instalaram-se armações metálicas com cobertura plástica para evitar o efeito das chuvas nos tratamentos DHI, 25, 50, 75 e 100%AD.

Efetuuou-se a primeira irrigação diferenciada no tratamento 100%AD, aos 42 DAG, quando as plantas estavam em pleno florescimento e a cobertura vegetal, quase completa. Os outros tratamentos começaram após essa data. O DHI (déficit hídrico imposto) recebeu uma única irrigação de 70 mm aos 61 DAG para amenizar o efeito de um severo estresse hídrico. Mesmo assim, suas plantas, bem como as do 25%AD, mostraram-se de menor porte, com folhas pequenas, e nunca completaram o recobrimento do solo.

Figura 7 - Irrigações e precipitações (mm) ocorridas nos diferentes tratamentos da cultura do feijoeiro, no inverno de 1986, em Campinas, SP.

No final do ciclo, aos 76 DAG, um vendaval danificou completamente todas as coberturas plásticas, seguido de duas precipitações de cerca de 30 mm cada uma. Com exceção do 100%AD, que ainda vegetava, todos os outros se mostravam visivelmente senescentes, não se tendo beneficiado, talvez, da umidade adicional.

O número, as lâminas e o intervalo de irrigação aplicados após o florescimento (42 DAG), nos tratamentos, encontram-se na Tabela 3, onde se pode ver que o M75 e o M50% se aproximaram dos obtidos no 75 e 50%AD respectivamente: no entanto, por serem realizados a céu aberto, o consumo de água foi ligeiramente maior e o intervalo entre irrigações, ligeiramente menor, quando comparados com 75% e 50%AD, sob plástico.

Tabela 3 - Número, lâminas e intervalo médio nas irrigações aplicadas após o florescimento no ensaio com feijoeiro, em Campinas, SP.

Tratamento	100%	75%	50%	25%	DHI	DHN	M75%	M50%
Nº. irrig.	9	4	3	2	1	3	5	3
L.aplic.(mm)	240	140	90	70	70	95	155	100
Interv.(dia)	3	7	9	12	18	10	6	8

4.2. Comportamento estomático do feijoeiro

A resistência estomática à difusão de vapor de água (r_g) nas folhas do feijoeiro foi tomada dos tratamentos mais representativos do efeito da água no solo - 100%AD, M75%, M50% e DHI - nos dias 4, 8, 10, 11, 16 e 23/9/86, respectivamente, 49, 53, 55, 56, 61 e 68 DAG.

Realizaram-se as medições em folíolos expostos que haviam atingido recentemente a maturação e, sempre que possível, posicionadas horizontalmente. Seus resultados se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência estomática total à difusão de vapor d'água (r_s), nos tratamentos de irrigação do feijoeiro medida no período da manhã (8h30m - 10h) e da tarde (14 - 15h). Cada valor é média tomada de dez folhas totalmente expostas e recém-amadurecidas.

Dias após a germinação	Período da manhã				Período da tarde			
	100%AD	M75%	M50%	DHI	100%AD	M75%	M50%	DHI
DAG	s.cm ⁻¹							
49	...	0,9	1,2	...	...	1,6	1,1	...
53	...	...	...	...	1,3	0,9	1,3	2,1
55	...	1,0	0,9	1,3	...	2,6	5,1	5,5
56	0,6	0,9	1,2	2,9	0,6	0,9	1,3	3,5
61	0,6	...	...	2,1	0,8	...	...	2,1
68	0,5	0,5	...	...	0,7	0,8	0,7	0,9

Esses valores apresentam variações da r_s , de 0,5 a 5,5 s.cm⁻¹, condizentes com outros trabalhos, como os de BERGAMASCHI (1984) e SANTOS (1985), em Piracicaba, SP, em similares intensidades de estresse hídrico. As medições no período da manhã eram sempre menores do que as obtidas à tarde, quando em geral ocorriam as maiores demandas de água para a atmosfera. O tratamento de irrigação freqüente (100%AD) sempre apresentou valores baixos de r_s (0,5 a 0,8 s.cm⁻¹), exceto aos 53 DAG, quando atingiu 1,3 s.cm⁻¹, imediatamente antes da irrigação (Figura 7).

O valor da r_s mais elevado ($5,5 \text{ s.cm}^{-1}$) foi medido no tratamento DHI, aos 55 DAG, após quinze dias da última precipitação ocorrida na parcela. Nesse tratamento, a irrigação somente no final de 62 DAG certamente permitiu o desenvolvimento do estresse hídrico até essa data, como se pode observar pelos dados de r_s medidos no período da manhã e da tarde. Os valores da tarde, coincidentemente, diminuíram de 55 para 56 e para 61 DAG, provavelmente pelo efeito das condições ambientais de temperatura, radiação e déficit de saturação do ar. Medições feitas seis dias após a irrigação no DHI (68 DAG) revelaram recuperação na abertura estomática das folhas do feijoeiro. A Tabela 4 mostra também que, no tratamento M50%, os valores foram um pouco mais acentuados que no M75%. Este, por outro lado, mostra índices próximos da r_s , comparados ao tratamento de irrigação freqüente nos dias em que as irrigações eram coincidentes.

4.3. Balanço hídrico

O balanço hídrico em condições de campo foi efetuado em todos os tratamentos a intervalos de quatro dias, desde os doze dias após a germinação até o final do ciclo da cultura.

O controle dos fluxos de entrada, saída e variação de água no solo foi a camada de 0-40 cm de profundidade, onde se encontram mais de 90% das raízes do feijoeiro (INFORZATO & MIYASAKA, 1963).

Nas Tabelas - 5 a 12 acham-se os valores dos termos do balanço hídrico, respectivamente, dos tratamentos 100, 75, 50 e 25%AD; DHI; M50 e M75%, e DHN.

Tabela 5 - Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr) na cultura do feijoeiro para o tratamento 100%AD, em 1986, em Campinas, SP.

Período	Precipit.	Irrig.	ΔA	Dren. prof.	ETr
mês dia	mm				
Ag. 1-5	0,0	0,0	-11,5	5,4	6,1
6-9	0,0	0,0	-9,0	1,4	7,6
10-13	4,2	30,0	22,0	7,3	4,8
14-17	38,1	0,0	18,5	13,2	6,4
18-21	21,9	0,0	-3,0	16,9	8,0
22-25	38,0	0,0	7,5	19,0	11,5
26-29	0,0	0,0	-23,0	11,3	11,7
Set. 30-2	0,0	45,0	23,5	8,8	12,7
3-6	0,0	25,0	-1,0	13,1	12,9
7-10	0,0	30,0	6,5	9,3	14,2
11-14	0,0	0,0	-24,0	10,6	13,4
15-18	0,0	60,0	28,0	17,3	14,7
19-22	0,0	0,0	-31,0	17,2	13,8
23-26	6,0	25,0	4,5	12,9	13,6
27-30	30,6	30,0	26,0	26,7	7,9
Out. 1-4	0,0	0,0	-33,0	20,2	12,8
5-8	0,0	0,0	-20,0	5,8	14,2
9-12	24,0	25,0	25,5	10,5	13,0
13-16	0,0	0,0	-20,0	6,0	14,0
Total	162,8	270,0	-14,5	232,9	213,3

Tabela 6 - Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr) na cultura do feijoeiro para o tratamento 75%AD, em 1986, em Campinas, SP.

Período	Precipit.	Irrig.	ΔA	Dren. prof.	ETr
mês dia	mm				
Ag. 1-5	0,0	0,0	-10,1	3,9	6,2
6-9	0,0	0,0	-9,0	2,9	6,1
10-13	4,2	30,0	22,0	7,6	4,6
14-17	38,1	0,0	15,0	16,7	6,4
18-21	21,9	0,0	0,5	15,9	5,5
22-25	38,0	0,0	11,0	18,1	8,9
26-29	0,0	0,0	-23,5	13,8	9,7
Set. 30-2	0,0	40,0	18,0	9,7	12,3
3-6	0,0	0,0	-19,0	6,1	12,9
7-10	0,0	30,0	6,5	12,5	11,0
11-14	0,0	0,0	-16,0	4,3	11,7
15-18	0,0	40,0	21,0	9,7	9,3
19-22	0,0	0,0	-14,0	5,1	8,9
23-26	0,0	30,0	17,0	3,4	9,6
27-30	30,6	0,0	11,5	11,3	7,8
Out. 1-4	0,0	0,0	-22,0	9,1	12,9
5-8	0,0	0,0	-15,5	3,9	11,6
9-12	24,0	0,0	11,5	2,3	10,2
13-16	0,0	0,0	-12,0	3,8	8,2
Total	156,8	170,0	-7,1	160,1	173,8

Tabela 7 - Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr) - na cultura do feijoeiro para o tratamento 50%AD, em 1986, em Campinas, SP

Período	Precipit.	Irrig.	ΔA	Dren. prof.	ETr
mês dia	mm				
Ag. 1-5	0,0	0,0	-8,4	2,5	5,9
6-9	0,0	0,0	-7,4	1,4	6,0
10-13	4,2	30,0	22,5	6,9	4,8
14-17	38,1	0,0	16,5	13,8	7,8
18-21	0,0	0,0	-14,0	8,4	5,6
22-25	38,0	0,0	16,0	13,7	8,3
26-29	0,0	0,0	-19,5	9,3	10,2
Set. 30-2	0,0	30,0	10,5	7,0	12,5
3-6	0,0	0,0	-17,5	5,2	12,3
7-10	0,0	20,0	1,0	8,0	11,0
11-14	0,0	0,0	-11,0	2,2	8,8
15-18	0,0	40,0	20,5	10,3	9,2
19-22	0,0	0,0	-14,0	4,9	9,1
23-26	0,0	0,0	-10,0	2,3	7,7
27-30	30,6	0,0	16,0	7,2	7,4
Out. 1-4	0,0	0,0	-11,0	4,3	6,7
5-8	0,0	0,0	-7,5	0,5	7,0
9-12	24,0	0,0	13,0	3,1	7,9
13-16	0,0	0,0	-10,5	1,9	8,6
Total	134,9	120,0	-14,8	112,9	156,8

Tabela 8 - Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento da água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr) na cultura do feijoeiro para o tratamento 25%AD, em 1986, em Campinas, SP.

Período		Precipitação	Irrig.	ΔA	Dren. prof.	ETr
mês	dia	mm				
Ag.	1-5	0,0	0,0	-11,5	5,7	5,8
	6-9	0,0	0,0	-8,0	2,7	5,3
	10-13	4,2	30,0	21,5	7,8	4,9
	14-17	38,1	0,0	16,0	16,1	6,0
	18-21	21,9	0,0	2,0	13,2	6,7
	22-25	38,0	0,0	10,0	20,0	8,0
Set.	26-29	0,0	0,0	-20,5	11,3	9,2
	30-2	0,0	0,0	-16,0	7,3	8,7
	3-6	0,0	40,0	26,0	6,5	7,5
	7-10	0,0	0,0	-15,0	9,3	5,7
	11-14	0,0	0,0	-13,0	4,3	8,7
	15-18	0,0	30,0	15,0	7,3	7,7
	19-22	0,0	0,0	-13,0	6,4	6,6
	23-26	0,0	0,0	-11,0	2,8	8,2
	27-30	30,6	0,0	14,5	8,2	7,9
	1-4	0,0	0,0	-10,0	3,3	6,7
Out.	5-8	0,0	0,0	-7,5	1,3	6,2
	9-12	24,0	0,0	14,5	2,2	7,3
	13-16	0,0	0,0	-9,5	2,4	7,1
Total		156,8	100,0	-15,5	138,1	134,8

Tabela 9 - Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento de água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr) - na cultura do feijoeiro para o tratamento DHI, em 1986, Campinas, SP.

Período	Precipit.	Irrig.	ΔA	Dren. prof.	ETr
mês dia	mm				
Ag. 1-5	0,0	0,0	-10,5	4,6	5,9
6-9	0,0	0,0	-8,5	2,6	5,9
10-13	4,2	30,0	21,5	8,1	4,6
14-17	38,1	0,0	15,0	16,8	6,3
18-21	21,9	0,0	0,0	16,1	5,8
22-25	38,0	0,0	12,0	17,6	8,4
26-29	0,0	0,0	-19,5	10,5	9,0
Set. 30-2	0,0	0,0	-15,0	6,5	8,5
3-6	0,0	0,0	-10,5	3,1	7,4
7-10	0,0	0,0	-6,5	0,5	6,0
11-14	0,0	0,0	-5,0	0,2	4,8
15-18	0,0	70,0	56,0	8,0	6,0
19-22	0,0	0,0	-18,9	14,3	4,6
23-26	0,0	0,0	-14,0	9,4	4,6
27-30	30,6	0,0	12,0	11,9	6,7
Out. 1-4	0,0	0,0	-13,0	6,2	6,8
5-8	0,0	0,0	-10,0	3,6	6,4
9-12	24,0	0,0	11,5	5,1	7,4
13-16	0,0	0,0	-9,8	3,9	5,9
Total	156,8	100,0	-13,2	149,0	121,0

Tabela 10 - Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento de água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr) - na cultura do feijoeiro para o tratamento M75%, em 1986, Cam nas, SP.

Período	Precipit.	Irrig.	ΔA	Dren. prof.	ETr
mês dia	mm				
Ag. 1-5	0,0	0,0	-9,7	3,2	6,5
6-9	0,0	0,0	-8,4	3,0	5,4
10-13	4,2	30,0	22,5	6,8	4,9
14-17	38,1	0,0	14,5	17,6	6,0
18-21	21,9	0,0	-3,5	18,5	6,9
22-25	77,4	0,0	21,0	45,1	11,3
26-29	9,2	0,0	-28,0	27,5	9,7
Set. 30-2	0,0	40,0	12,0	16,4	11,6
3-6	0,0	0,0	-19,3	7,3	12,0
7-10	0,0	30,0	7,0	8,9	14,1
11-14	0,0	30,0	9,0	9,2	11,8
15-18	0,0	25,0	8,0	6,2	10,8
19-22	0,0	0,0	-19,0	5,8	13,2
23-26	6,0	30,0	20,0	4,9	11,1
27-30	30,6	0,0	8,5	15,7	6,4
Out. 1-4	0,0	0,0	-23,5	10,9	12,6
5-8	0,0	0,0	-16,0	3,2	12,8
9-12	24,0	0,0	11,5	3,9	8,6
13-16	0,0	0,0	-14,0	2,7	11,3
Total	211,4	185,0	-7,4	216,8	187,0

Tabela 11 - Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento de água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr) - na cultura do feijoeiro para o tratamento M50%, em 1986, Campinas, SP.

Período	Precipit.	Irrig.	ΔA	Dren. prof.	ETr
mês dia	mm				
Ag. 1-5	0,0	0,0	-10,8	4,8	6,0
6-9	0,0	0,0	-9,6	2,1	7,5
10-13	4,2	30,0	22,5	7,6	4,1
14-17	38,1	0,0	17,5	15,1	5,5
18-21	21,9	0,0	-1,0	16,6	6,3
22-25	77,4	0,0	22,0	44,5	10,9
26-29	9,2	0,0	-31,0	29,4	10,8
Set. 30-2	0,0	0,0	-18,5	8,8	9,7
3-6	0,0	40,0	20,5	13,0	6,5
7-10	0,0	0,0	-20,0	7,5	12,5
11-14	0,0	30,0	14,0	6,2	9,8
15-18	0,0	0,0	-14,5	3,1	11,4
19-22	0,0	30,0	9,5	9,3	11,2
23-26	6,0	0,0	-8,5	3,0	11,5
27-30	30,6	0,0	19,0	5,6	6,0
Out. 1-4	0,0	0,0	-18,0	4,9	13,1
5-8	0,0	0,0	-9,5	1,4	8,1
9-12	24,0	0,0	14,0	1,7	8,3
13-16	0,0	0,0	-13,5	2,8	10,7
Total	211,4	130,0	-15,9	187,4	169,9

Tabela 12 - Valores dos componentes do balanço hídrico de campo - precipitação, irrigação, variação no armazenamento de água no solo (ΔA), drenagem profunda e evapotranspiração real (ETr) - na cultura do feijoeiro para o tratamento DHN, em 1986, Campinas, SP.

Período	Precipit.	Irrig.	ΔA	Dren. prof.	ETr
mês dia	mm				
Ag. 1-5	0,0	0,0	-10,9	4,3	6,6
6-9	0,0	0,0	-8,0	2,3	5,7
10-13	4,2	30,0	23,0	6,9	4,3
14-17	38,1	0,0	15,0	17,2	5,9
18-21	21,9	0,0	0,0	15,1	6,8
22-25	77,4	0,0	22,0	44,4	11,0
26-29	9,2	0,0	-30,5	30,3	9,4
Set. 30-2	0,0	40,0	16,0	14,8	9,2
3-6	0,0	0,0	-16,5	10,4	6,1
7-10	0,0	0,0	-12,5	6,0	6,5
11-14	0,0	30,0	15,0	4,8	10,2
15-18	0,0	0,0	-12,0	2,2	9,8
19-22	0,0	25,0	10,0	4,9	10,1
23-26	6,0	0,0	-5,0	2,8	8,2
27-30	30,6	0,0	15,0	9,5	6,1
Out. 1-4	0,0	0,0	-14,8	6,3	8,5
5-8	0,0	0,0	-9,5	2,4	7,1
9-12	24,0	0,0	10,0	5,9	8,1
13-16	0,0	0,0	-9,8	2,7	7,1
Total	211,4	125,0	-3,5	193,2	146,7

4.3.1. Adição de água no sistema

A contribuição de água no ensaio, conforme item 4.1, deu-se pela precipitação natural e irrigação dos tratamentos. As quantidades totais de água aplicada em termos relativos ao DHI ou 25%AD foram de até 170% para o 100%AD. No entanto, a diferenciação principal na quantidade de água aplicada refere-se à fase reprodutiva da cultura, em vista da precipitação freqüente no início do ciclo. As diferenças nos valores de precipitações, apresentadas nas Tabelas 5 a 12, foram devidas à cobertura plástica nos tratamentos DHI e de 100% a 25%AD.

4.3.2. Variação no armazenamento de água no solo

Calculou-se a variação da água no solo a partir da água total armazenada medida no início e no fim de cada período do balanço hídrico. Conforme se pode ver nas Tabelas 5 a 12, trata-se da componente do balanço hídrico de menor variação. Isso também foi observado por COSTA (1986) e REICHARDT (1987). Essa componente, porém, possivelmente seja a que mais afete o comportamento fisiológico da cultura, por estar diretamente ligada ao teor de umidade e tensão de água no solo.

4.3.3. Drenagem profunda

As perdas de água por drenagem, abaixo do sistema radicular efetivo da cultura (40 cm), foram altas durante o ensaio. Em geral, seus valores variaram de 49 a 58% do total de água adicionada ao sistema (P + I). As precipitações freqüentes concentradas no período compreendido logo após a primeira irrigação geral (25 DAG) até 40

DAG (Figura 7) contribuíram, em muito, para a magnitude observada. Uma avaliação da cobertura plástica, no tratamento 50%AD, evitou uma precipitação de 21,9mm aos 35 DAG. Em consequência, a perda por drenagem profunda nesse tratamento reduziu-se para 44%.

Houve correlação positiva entre os valores acumulados da drenagem profunda (D) e a precipitação mais irrigação (P + I), para todos os tratamentos analisados conjuntamente ($R^2 = 0,91^{**}$ para oito observações):

$$D = 0,6 (P + I) - 22,4$$

Assim, contribuições acima de 37 mm representam, em perdas por drenagem, 0,6 mm/mm. Coincidentemente, o valor de 37 mm se aproxima daqueles típicos de uma irrigação.

A maior perda em valores absolutos ocorreu no tratamento de irrigação freqüente. Nos com cobertura plástica, o aumento de freqüência de irrigação elevou a quantidade de água drenada, com exceção do 50%AD, pelo motivo acima exposto. Os tratamentos sem cobertura plástica apresentaram valores de perda próximos entre si, porém o que recebeu mais água - M75% - foi superior.

Nos períodos considerados no balanço hídrico - Tabelas 5 a 12 - em que não houve chuvas ou irrigações, a maior taxa de drenagem foi de $5,1 \text{ mm.dia}^{-1}$ (de 1º a 4/9) e $4,3 \text{ mm.dia}^{-1}$ (19 a 22/8) no tratamento 100%AD, seguido por $3,6 \text{ mm.dia}^{-1}$ (26 a 29/8) no DHI. A umidade do solo e a irrigação mais a precipitação, ocorridas imediatamente antes desses períodos, afetaram a magnitude de tais taxas.

Alguns erros podem ser admitidos na técnica do balanço hídrico de campo, sobretudo na determinação da drenagem profunda através da equação de Darcy. Consequentemente, os valores da evapotranspiração podem ser superestimados pela subestimativa da drenagem na faixa de alta umidade do solo (REICHARDT et alii, 1974).

Para BLACK et alii (1981), o período para cálculo da drenagem profunda deveria ser menor que um dia em época chuvosa. No presente estudo, não se diferenciaram os períodos secos e úmidos para a determinação do teor de umidade do solo, sendo utilizados os valores médios de cada período. Outra fonte de erro é que as variações no gradiente de potencial hidráulico foram desprezadas e, consequentemente, a contribuição pela ascensão capilar. BRUNINI (1981) usando procedimento similar ao presente trabalho mostrou que, para esse tipo de solo, os valores obtidos de ETr eram coerentes, e que outros erros, como na estimativa de K_0 , muito maiores do que $\partial\psi/\partial z$. Aparentemente, houve uma compensação nos erros envolvidos nas estimativas de $\partial\psi/\partial z$ e $K(\theta)$, em face dos resultados obtidos.

A drenagem profunda representou entre 40 e 60% do total de água que entrou ao sistema, semelhante a 57,8% obtido por PAULA SOUZA et alii (1979), embora esses autores tenham considerado a profundidade efetiva de 120 cm.

4.3.4. Evapotranspiração

Os dados de evapotranspiração real (ETr) acumulada durante a estação nos tratamentos do feijoeiro variaram de 121 a 213,3 mm, mostrando que houve acentuado efeito dos tratamentos - Tabelas 5 a 12. Tais dados, em termos de valores médios diários, foram de: 2,76; 2,24; 2,06; 1,70; 1,50; 2,40; 2,21 e 1,87 mm.dia⁻¹ para os tratamentos 100, 75, 50 e 25%AD; DHI, M75 M50% e DHN respectivamente. Todos eles são consistentes com o obtido por SILVEIRA & STONE (1979) no período seco, 2,8 mm.dia⁻¹, e menores do que os de GIRALT (1979), 3,3 a 3,5 mm.dia⁻¹ e de SANTOS (1985), 4,0 mm.dia⁻¹ no verão. Os resultados dos tratamentos M75 e M50% foram próximos aos de 75 e 50%AD respectivamente. A ETr naqueles tratamentos foi cerca de 8% maior do que nos cobertos.

A ETr diminuiu linearmente com a redução na lâmina de irrigação dos tratamentos, em relação ao 100%AD, de 0,39 mm para a redução de cada milímetro de irrigação até o nível de 50%AD. A partir desse ponto, o decréscimo em ETr foi cada vez mais acentuado, de acordo com a severidade do tratamento. Quando a ETr acumulada é analisada entre os tratamentos 25 a 100%AD, observa-se a seguinte relação:

$$\text{ETr (mm)} = 106,6 + 1,01 \text{ AD\%} \quad (R^2 = 0,97; n = 4).$$

A evolução da ETr ocorrida nos tratamentos é mostrada na Figura 8, juntamente com a evapotranspiração de referência (ET_0), calculada a partir da evaporação do tanque classe A. O tratamento que recebeu irrigação frequente - 100%AD - apresentou uma taxa de ETr menor do que ET_0 até aproximadamente o florescimento (40 DAG), provavelmente devido estar a área foliar ainda em desenvolvimento. No estágio reprodutivo e final, as taxas mantiveram-se aproximadamente constantes, observando-se que a colheita do 100%AD se processou quando as folhas ainda estavam verdes e possivelmente ativas.

A imposição dos tratamentos de irrigação iniciou-se aos 42 DAG, porém já aos 36 DAG começou a supressão das chuvas, com o uso de cobertura plástica nos tratamentos. Assim, na Figura 8, há indicação de diferenças na ETr entre os tratamentos aos 40 DAG, acentuando-se ao longo do ciclo da cultura. A acentuada redução na ETr dos tratamentos 25%AD e DHI, em relação aos outros, deu-se não apenas pela ação estomática do estresse hídrico (Tabela 4), mas também pelo efeito da água na área foliar. Segundo HSIAO (1973) e HSIAO & ACEVEDO (1974), entre outros, a extensão celular e o crescimento de folhas são os processos inicialmente afetados pelo déficit hídrico na planta, antes mesmo da abertura estomática. Observações visuais no

campo indicaram que, no florescimento, os tratamentos de menor dotação de rega diminuíram o crescimento, com plantas de menor estatura e folhas pequenas. A cobertura vegetal do solo se completou primeiramente no tratamento de irrigação mais freqüente, seguido do 75 e 50%AD. Abaixo da água disponível deste último, a cobertura vegetal do solo manteve-se incompleta até o final do ciclo. Resultados semelhantes foram encontrados por RESENDE et alii (1981) na Califórnia.

O maior valor médio de E_{Tr} foi de $3,7 \text{ mm.dia}^{-1}$ no tratamento 100%AD (60-63 DAG), quando E_{To} atingiu o seu maior valor médio $4,7 \text{ mm.dia}^{-1}$.

A evapotranspiração resulta de uma ação do ambiente, sendo controlada pela planta, como se pode analisar pelo comportamento do tratamento DHI: Figura 9. Logo após um período de pleno suprimento de água (até 36 DAG), a E_{Tr} era muito próxima de E_{To} . A diferença observada de 36 a 40 DAG era devida principalmente à cobertura vegetal incompleta, visto que as diferenças na resistência estomática pouco se alteram após a irrigação se os dias forem amenos (Tabela 4). O aumento de E_{To} em 40-48 DAG não correspondeu em aumento proporcional na E_{Tr} , possivelmente por alguma restrição hídrica no solo. Essa restrição se foi agravando sistematicamente até a aplicação de água aos 62 DAG: houve uma redução de $0,075 \text{ mm}$ na E_{Tr} para cada dia desse período, independente da demanda evaporativa. Os 70 mm de irrigação bastaram para a reposição da umidade do solo até à capacidade de campo. Mesmo assim, não houve recuperação completa na taxa evaporativa das plantas do tratamento DHI até os 68 DAG. Pelos resultados do balanço hídrico, essa recuperação foi gradativa, apesar de as medições de r_s , realizadas na tarde de 68 DAG, indicarem a plena abertura dos estômatos ($0,9 \text{ s.cm}^{-1}$ para DHI e $0,7 \text{ s.cm}^{-1}$ para 100%AD - Tabela 4). As medições complementares de r_s e temperatura, realizadas com o porômetro, indi-

cavam um aquecimento dos folíolos no tratamento DHI de $0,9^{\circ}\text{C}$ em relação à temperatura do ar, ao passo que, nos tratamentos irrigados, os folíolos se apresentavam com temperatura 1 a $1,7^{\circ}\text{C}$ abaixo da do ar. Houve, possivelmente, aumento em outras resistências ao fluxo d'água no sistema solo-planta-atmosfera, além de modificações na exposição dos folíolos à radiação direta, associado ao visível amarelecimento geral do tratamento e senescência das folhas velhas.

Figura 8 - Evapotranspiração de referência (ET_0) e evapotranspiração real (E_{Tr}) acumulada para diferentes níveis de aplicação de água na cultura do feijoeiro, determinadas no inverno de 1986, em Campinas, SP.

DIAS APÓS A GERMINAÇÃO

Figura 9 - Variação temporal da evapotranspiração de referência (ET_0), e da real (ET_r), em períodos após a aplicação de água (38 mm aos 36 DAG e 70 mm aos 62 DAG) no tratamento DHI da cultura do feijoeiro, no inverno de 1986, em Campinas, SP.

4.4. Balanço de energia

Ao longo do ciclo da cultura e após o início das diferenciações da irrigação, efetuaram-se observações micrometeorológicas em cinco períodos com duração de três a quatro dias cada um, nos tratamentos 100%AD e M75%. Em cada período, estabeleceu-se um dia típico para efeito de cálculo do balanço de energia.

O critério adotado para a seleção foi em função do nível de umidade do solo, da seqüência sistemática das observações ao longo do dia e do bom funcionamento dos instrumentos nos tratamentos, principalmente dos psicrômetros, e do sistema de aquisição de dados. Assim, os dias considerados para estudo em questão foram: 28.8, quando a cultura apresentava 42 DAG; 11.9 (56 DAG); 16.9 (61 DAG); 23.9 (68 DAG), e 10.10.86 (76 DAG), correspondentes à fase de florescimento ao início da maturação.

Os resultados referentes à temperatura do ar (seco: T , úmido: TU), do gradiente psicrométrico ($\Delta T / \Delta TU$), radiação líquida (RN), fluxo de calor no solo ($-G$) e demais componentes do balanço de energia, obtidos nos tratamentos de irrigação e calculados através das eq. (15) a (18), são apresentados no Apêndice 1 e discutidos a seguir.

4.4.1. Dia 28-8-86 (42 DAG)

Esse dia se caracterizou por uma evapotranspiração potencial de $4,2 \text{ mm.dia}^{-1}$, estimada pelo tanque classe A e de $5,8 \text{ mm.dia}^{-1}$, por Penman, insolação de 10,6 horas, sem ocorrência de nuvens, velocidade média de $5,0 \text{ m.s}^{-1}$ e temperatura máxima em torno de $28,5^{\circ}\text{C}$.

A variação dos componentes do balanço de energia encontra-se nas Figuras 10 e 11, para os tratamentos 100%AD e M75% respectivamente. As diferenças no índice da evapotranspiração ($-LE$) dependem, sobretudo, do regime de umidade do solo e das condições micrometeorológicas.

O tratamento 100%AD teve como suprimento de água anterior ao dia 28/8 uma precipitação de 38 mm, a 36 DAG. Esse foi o período de maior deficiência hídrica nesse tratamento de alta frequência de irrigação: longo o suficiente para afetar a partição da energia disponível no sistema, resultando numa redução no fluxo de vapor ($-LE$) e no aumento da componente do calor sensível ($-H$) em relação ao M75%.

As precipitações ocorridas até dois dias antes de 42 DAG possibilitaram que a maior parte de RN fosse utilizada no processo evaporativo ($-LE$). Nessa situação, a razão de Bowen (β) apresentou valores muito próximos da nulidade (Apêndice 1.1.b), caso típico da boa disponibilidade de água para a cultura, de acordo com SLATYER (1967). Por outro lado, os valores de β no tratamento 100%AD mostraram-se mais elevados e sempre positivos (Apêndice 1.1.a).

O fluxo de calor no solo ($-G$) não foi elevado em ambos os tratamentos porque o solo, como mencionado, apresentava-se com bom suprimento hídrico e, a superfície, quase totalmente vegetada.

Figura 10 - Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 28.8.86, no tratamento 100%AD.

Figura 11 - Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 28.8.86, no tratamento M75%.

4.4.2. Dia 11.9.86 (56 DAG)

Nesse dia, houve uma evapotranspiração potencial de $3,4 \text{ mm.dia}^{-1}$ pelo tanque classe A e $4,5 \text{ mm.dia}^{-1}$, calculado por Penman, insolação de 10,5 horas, com o céu totalmente aberto, velocidade média do vento de $2,3 \text{ m.s}^{-1}$ e temperatura máxima de $29,0^{\circ}\text{C}$.

As Figuras 12 e 13 apresentam a variação dos componentes do balanço de energia para os tratamentos 100%AD e M75% respectivamente. A condição pouco mais amena do dia 11.9, quando comparada à do 28.8, resultou em partição da radiação líquida (RN) dos tratamentos 100%AD e M75% similar ao daquele dia. Apesar de que em 11.9 a disponibilidade de água no solo era um pouco menor e de forma invertida para os tratamentos 100% AD e M75%, visto que haviam decorridos cinco e dois dias desde o último suprimento de água respectivamente. No presente caso, o suprimento de água no 100%AD ocorreu na manhã de 55 DAG e no M75% quatro dias antes. Medições de resistência estomática, às 14h, mostraram uma diferença de $0,3 \text{ s.cm}^{-1}$ apenas entre os tratamentos 100%AD e M75% (Tabela 4). De fato, a perda por evapotranspiração (-LE) ocorrida nessa hora era um pouco maior para o 100%AD. Entretanto, as medições de r_s tomadas na tarde desse dia, aparentemente, não expressaram a situação de maior déficit hídrico na planta, visto que a depressão de (-LE) ocorreu entre 11 e 12h : Figuras 12 e 13.

A maior disponibilidade de água no tratamento 100%AD propiciou uma taxa evaporimétrica maior do que no M75% e uma recuperação mais rápida à depressão da evapotranspiração no meio do dia. Os valores mais elevados da relação de Bowen (Apêndice 1.2.a) evidenciam o nível menor de armazenamento de água no solo do M75%. É interessante notar o efeito advectivo à tarde no 100%AD. Isso se repetiu algumas vezes durante a estação, porém nem sempre evi-

dente nos resultados do presente trabalho. LUCHIARI JR. (1988) relata a ocorrência regular de advecção vespertina na cultura do trigo irrigado na região de Goiânia.

4.4.3. Dia 16.9.86 (61 DAG)

Em 16.9, embora correspondente ainda à fase de enchimento dos grãos, algumas plantas se apresentavam com flores: a temperatura máxima era de $31,8^{\circ}\text{C}$; velocidade média do vento $1,7 \text{ m.s}^{-1}$, e evapotranspiração potencial (tanque classe A), $4,8 \text{ mm.dia}^{-1}$ e de $4,9 \text{ mm.dia}^{-1}$ (Penman) com insolação de 9,4 horas.

Ambos os tratamentos revelavam bom suprimento de água, pela proximidade das irrigações realizadas na manhã da véspera para o 100%AD, e de dois dias no M75% - Figuras 14 e 15. Apesar dessa alta disponibilidade de água no solo, houve reduções na taxa evaporativa no meio do dia no M75%, em vista da alta demanda da atmosfera. A recuperação do sistema, aparentemente, processou-se rapidamente, visto que $-LE$ e RN , como no 100%AD, se aproximaram muito durante toda a tarde. A transferência da energia do ar para a superfície evaporante também pode ser observada em ambos, embora em intensidades e horários diferentes, com valores da razão de Bowen negativos. Essa contribuição do fluxo do calor sensível ($-H$) para o latente ($-LE$), ocorreu desde as 10h até o final da tarde no 100%AD, e a partir das 12h, no M75%. Nessas condições, a relação $-LE/RN$ aproximou-se de 1,0 (0,92 no 100%AD e 0,82 no M75%). Embora a advecção tenha contribuído com adição de energia ao sistema, não refletiu no fluxo de calor no solo ($-G$), comparativamente aos outros dias.

Figura 12 - Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 11.9.86, no tratamento 100%AD.

Figura 13 - Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 11.9.86, no tratamento M75%.

Figura 14 - Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 16.9.86, no tratamento 100%AD.

Figura 15 - Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 16.9.86, no tratamento M75%.

4.4.4. Dia 23.9.86 (68 DAG)

O dia 23.9 caracterizou-se por apresentar períodos nublados (7,1 horas de insolação), diminuindo a radiação em torno do meio-dia. A evapotranspiração potencial estimada pelo tanque classe A foi de $4,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ e, por Penman, de $5,0 \text{ mm.dia}^{-1}$, com a temperatura máxima em torno de 30°C .

A última irrigação recebida pelos tratamentos 100%AD e M75%, coincidentemente, ocorreu a 63 DAG. As variações dos componentes do balanço de energia ao longo do dia 23.9 (Figuras 16 e 17) mostraram-se muito próximas entre os dois tratamentos, indicando que, provavelmente, o déficit hídrico desenvolvido nas plantas de ambos tenha afetado $-LE$ de forma similar. Essas figuras também mostram períodos de nebulosidade que caracterizaram os horários da tarde, quando todos os componentes do balanço de energia diminuíram de forma irregular, com uma pequena defasagem no fluxo do calor no solo, como era de esperar.

Os valores elevados de β no início da manhã, nos tratamentos, indicam uma imprecisão na estimativa da evapotranspiração nesse intervalo (Apêndice 1.4). Posteriormente, β estabilizou-se, com quase a totalidade de energia disponível sendo utilizada no fluxo de vapor (evaporação). Houve também uma contribuição do fluxo de calor sensível ($-H$) por volta das 13 às 16h para o incremento de $-LE$.

As medições de resistência estomática também não diferiram entre os dois tratamentos, tanto no período da manhã quanto no da tarde, na hora próxima da maior demanda evaporativa (Tabela 4).

A similaridade dos resultados de $-LE$ e r_g , para ambos os tratamentos, indica a pouca influência do histórico de irrigação na ETr , quando da realização de uma irrigação geral. Isso talvez seja real apenas para os

tratamentos de irrigação próximos, como o 100 e o 75%AD. Além disso, a imposição dos tratamentos somente no meio da estação talvez não tenha modificado significativamente a arquitetura da planta, o movimento de folhas, a área foliar e outros atributos que interferem no seu consumo de água.

As taxas de LE de 23.9 foram maiores do que as do tratamento 100%AD, em 28.8, para um mesmo intervalo de cinco dias desde a última precipitação, provavelmente como resultado de um armazenamento menor de água no solo naquela data, visto que, apesar da nebulosidade do dia 23, as condições meteorológicas gerais de ambos os dias são próximas.

4.4.5. Dia 19.10.86 (76 DAG)

A cultura do feijoeiro, aos 76 DAG, iniciava-se no estágio de maturação fisiológica. Os tratamentos de irrigação mais frequentes apresentavam completa cobertura vegetal do solo. A evapotranspiração potencial, nesse dia, de $5,1 \text{ mm.dia}^{-1}$ (tanque classe A) e $5,3 \text{ mm.dia}^{-1}$ (Penman); a temperatura máxima, de $28,3^{\circ}\text{C}$; insolação, de 9,9 horas e períodos com nebulosidade variável à tarde. A evapotranspiração real representou 89,2 e 93,8% da energia radiante, respectivamente, para os tratamentos 100%AD e M75%, embora nesse cômputo tenha ocorrido contribuição esporádica do ar por advecção. Assim, os fluxos de calor no solo e sensível para a atmosfera representaram pequena fração da radiação líquida (Apêndice 1.5 e Figuras 18 e 19).

Figura 16 - Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 23.9.86, no tratamento 100%AD.

Figura 17 - Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 23.9.86, no tratamento M75%.

Figura 18 - Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 19.10.86, no tratamento 100%AD.

Figura 19 - Variação horária da radiação líquida (RN), do fluxo de calor no solo (-G), do fluxo de calor sensível (-H) e latente (-LE) em cultura de feijão, no dia 19.10.86, no tratamento M75%.

4.5. Coeficiente de cultura

Os coeficientes de cultura (K_c), obtidos ao longo do ciclo do feijoeiro, encontram-se na Tabela 13. Seus valores estacionais variaram de 0,52 a 0,85, em função dos tratamentos de umidade. De fato, existe uma estreita correlação entre os valores gerais de K_c com a porcentagem de água disponível ($R^2 = 0,88^{**}$, para oito observações). Nesse caso, obteve-se a equação abaixo, bastante insensível para analisar a contribuição de uma única irrigação típica no valor do K_c estacional:

$$K_c = 0,41 + 0,0017 \cdot I$$

Apesar de, no presente trabalho, não se ter tido um tratamento sem irrigação, porém, essa equação estima um K_c médio igual a 0,41, obtido apenas às custas da precipitação natural.

Os valores estacionais de K_c médio (Tabela 13) concordam com os obtidos por LUCHIARI JR. (1978) e SANTOS (1985), em Piracicaba: 0,88 e 0,73 respectivamente. No entanto, no tratamento 100%AD, foi menor do que o índice 0,99, de ENCARNACÃO (1980), obtido em evapotranspirômetro de nível constante, também em Piracicaba, porém maior do que o 0,7-0,8 recomendado pela FAO (DOORENBOS & KASSAM, 1979).

No início do ciclo da cultura, as freqüentes precipitações afetaram, certamente, a estimativa de E_{Tr} (item 4.3.4). Conseqüentemente, K_c também foi afetado, como se pode notar pelos dados acima de 1,0, num período de pouca probabilidade de ocorrência de advecções. Percebem-se, em todos os casos, elevados valores de K_c , se comparados com os de DOORENBOS & KASSAM (1979). A cultura ainda apresentava pouca área foliar e as precipitações pluviais contribuíram para que as perdas por evaporação direta da superfície do solo fossem mais significativas. Esse perío-

do inicial de cinco semanas representou apenas 30% do total da ETr ocorrida no ciclo da cultura.

A partir da diferenciação nos níveis de aplicação da água (Figura 7), 40 DAG, os índices de Kc diversificaram-se entre os tratamentos (Tabela 13): os máximos verificaram-se apenas após 76 DAG, posteriormente à época em que a área foliar da cultura se estabiliza (BERGAMASCHI, 1984, e SANTOS, 1985).

Entre os valores observados ao longo do ciclo (Tabela 13), os do 100%AD aproximaram-se dos de SANTOS (1985) e dos recomendados pela FAO (DOORENBOS & KASSAM, 1979), exceto na fase próxima da colheita. Nesse período final, a ocorrência de chuvas e de uma irrigação tardia provavelmente tenham contribuído para que os dados obtidos fossem maiores.

A diferença nos coeficientes culturais entre os tratamentos DHN, 25%AD e DHI, apesar de o volume de água aplicado ser semelhante, deve-se à amplitude do turno de rega (Figura 7). Assim, o estresse mais drástico e prolongado às plantas do DHI resultou em menor desenvolvimento vegetativo, maiores valores de resistência estomática (r_g) (Tabela 4) e, conseqüentemente, menor Kc.

Os resultados da Tabela 13 servem para a orientação da prática da irrigação no campo, de acordo com o histórico da cultura, visto que valores de Kc se mostraram dependentes da data das irrigações (Figura 7) e do estresse admissível em cada tratamento (Tabela 4) pelo seu efeito na ETr (item 4.3.4. e Figura 9).

O fato de o cálculo do balanço hídrico de campo englobar um período de quatro dias dificulta a diferenciação do efeito real desses fatores ambientais e de manejo de irrigação no Kc. No entanto, uma análise nesse sentido foi feita com os resultados do tratamento DHI, no período de 36 a 70 DAG, e parcialmente discutido no item 4.3.4 e Figura 9, e sumariado a seguir.

Tabela 13 - Resultados do coeficiente de cultura (Kc) obtidos no tratamentos de irrigação ao longo do ciclo da cultura do feijoeiro, de 1º de agosto a 16 de outubro de 1986, em Campinas, SP.
A ETo foi calculada a partir da evaporação do tanque classe A, e a ETr, pelo método do balanço hídrico de campo, em períodos de quatro dias.

Período (DAG)	ETo Classe A	Kc					
		100%AD	75%AD	50%AD	25%AD	DHI	M50% M75%
14 - 19	3,4	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,41
20 - 23	3,6	0,53	0,42	0,42	0,38	0,42	0,39
24 - 27	2,6	0,46	0,44	0,46	0,46	0,46	0,42
28 - 31	1,6	1,00	1,00	1,25	0,94	1,00	0,94
32 - 35	1,6	1,25	0,88	0,88	1,06	0,88	1,00
36 - 39	2,3	1,26	0,96	0,91	0,87	0,91	1,17
40 - 43	3,6	0,80	0,67	0,72	0,64	0,61	0,75
44 - 47	3,6	0,89	0,86	0,86	0,61	0,58	0,67
48 - 51	2,5	1,28	1,28	1,24	0,76	0,72	0,64
52 - 55	4,1	0,88	0,68	0,68	0,34	0,36	0,76
56 - 59	4,2	0,78	0,69	0,52	0,52	0,28	0,62
60 - 63	4,7	0,79	0,49	0,49	0,40	0,32	0,57
64 - 67	3,8	0,89	0,58	0,60	0,42	0,29	0,87
68 - 71	4,0	0,85	0,60	0,48	0,50	0,28	0,70
72 - 75	3,3	0,61	0,61	0,54	0,61	0,52	0,45
76 - 79	3,3	0,97	0,97	0,52	0,52	0,52	1,00
80 - 83	4,7	0,76	0,62	0,38	0,34	0,34	0,42
84 - 87	3,0	1,07	0,87	0,67	0,60	0,60	0,70
88 - 91	4,1	0,85	0,49	0,54	0,44	0,36	0,66
14 - 91	3,37	0,85	0,70	0,66	0,57	0,52	0,68
							0,61

A ETr se aproxima da ETo, para valores elevados do IAF e com alta disponibilidade de água no solo (próximo a 100%AD). Dependendo da severidade do estresse, não há pronta recuperação na taxa transpiratória da cultura, e o Kc continua baixo logo após a irrigação. Com a imposição de estresse hídrico prolongado, a ETr aproxima-se de um valor baixo que gradualmente se reduz ao longo do tempo, de forma quase independente do valor da ETo. Nessa situação de estresse acentuado, Kc apresenta-se variável e fortemente dependente de ETo, visto que ETr pouco varia.

Uma comparação entre os resultados de Kc foi feita entre os dois métodos utilizados no cálculo da ETr: balanço hídrico de campo e balanço de energia. A Tabela 14 apresenta essa comparação para seis diferentes dias durante o ciclo da cultura do feijoeiro.

Os índices de ETr determinados pelos dois métodos não são passíveis de comparação por se tratar de períodos de ocorrência diferentes, mas, com o cálculo de ETr/ETo , a influência do período deveria ser eliminada. Isso, no entanto, parece não ocorrer (Tabela 14), pois a correlação encontrada entre os valores de Kc foi baixa (0,44).

Um exemplo do efeito da duração do período, associado a outros fatores, pode ser visto na análise do dia 56 (Tabela 14). A determinação no 100%AD ocorreu logo após a irrigação combinada a condições de advecção no período da tarde (Figura 12), resultando em Kc maior que 1,0. Por outro lado, o balanço hídrico de campo considerou o período 56-59 DAG (um a cinco dias após a irrigação) suficientemente longo para mostrar diferenças na abertura estomática (Tabela 4) e redução na ETr, visto não ter ocorrido aplicação de água (Figura 7).

Tabela 14. Comparação entre coeficientes de cultura (K_c) calculados pelo método do balanço hídrico de campo (B.H.), em períodos de quatro dias, e pelo método do balanço de energia (B.E.) ao curso do dia indicado, em seis diferentes épocas e em três tratamentos de irrigação do feijoeiro. ETo: evapotranspiração de referência, calculada pelo tanque classe A - C.A (média de quatro dias), e por Penman no dia indicado.

DAG	ETo		100%AD		M75%		DHI	
	C.A*	Penman	B.H.*	B.E.	B.H.*	B.E.	B.H.*	B.E.
---mm/dia---								
42	3,6	5,8	0,80	0,62	0,67	0,50	0,61	0,60
54	4,1	5,5	0,88	0,76	0,85	0,62	0,36	...
56	4,2	4,5	0,78	1,07	0,71	0,73	0,28	...
61	4,7	4,9	0,79	0,76	0,57	0,67	0,32	...
68	4,0	5,0	0,85	0,96	0,70	0,94	0,28	...
76	3,3	5,3	0,97	0,98	0,97	1,00	0,52	0,83

(*) Média de quatro dias consecutivos.

Outro elemento importante na comparação entre os métodos de determinação de K_c refere-se à forma de cálculo da evapotranspiração de referência. Os dados de ETo calculados por Penman, usados no balanço de energia, não são comparáveis aos valores médios de ETo calculados para quatro dias a partir da evaporação do tanque classe A, usado no balanço hídrico de campo. Assim, também não produziram resultados consistentes os índices diários de ETo por Penman e pelo tanque nos seis dias de análise (0,46).

Verificaram-se resultados consistentes de Kc quando as condições do dia e do período eram similares. Por exemplo, o 76 DAG e o período 76-79 DAG caracterizaram-se por ser úmidos e não apresentar restrição de água em todos os tratamentos; nesse período, não houve recuperação total da taxa de transpiração no tratamento DHI, conforme discutido no item 4.3.4. (Figura 9).

Os dados de ETr e Kc pelo balanço de energia não foram apresentados no tratamento DHI para aqueles dias de restrição hídrica acentuada. Os resultados obtidos nesses casos apresentaram índices elevados da razão de Bowen e, muitas vezes, discrepantes. PEDRO JR.(1977) também não obteve sucesso com o balanço de energia, em condições similares, na cultura de soja, em Campinas.

4.6. Produção final.

4.6.1. Benefício da irrigação e uso da água

Na Tabela 15, encontram-se os resultados de produção final de grãos obtidos com os tratamentos de irrigação. A produção das parcelas variou de 1.287 kg.ha⁻¹, para o tratamento que recebeu menos água (DHI), até 2.145 kg.ha⁻¹, para o mais favorável (M75%). A produtividade normal, dependendo das condições ambientes e do sistema de cultivo, vai de 900 a 1.800 kg.ha⁻¹, segundo o INSTITUTO AGRONÔMICO (1987). Portanto, a produtividade do presente estudo pode ser considerada acima da média e satisfatória em termos de irrigação por aspersão, segundo BULISANI (1987).

A Tabela 15 indica que houve dois níveis de produtividade no ensaio, como resultado do efeito da cobertura plástica protetora contra a precipitação. A comparação entre os tratamentos 75 e 50%AD com M75 e M50%

indica serem os últimos cerca de 15% mais produtivos. Provavelmente, a cobertura plástica tenha reduzido a radiação fotossinteticamente ativa nas parcelas cobertas durante grande parte do ciclo da cultura.

Considerando que os tratamentos de irrigação se iniciaram somente a partir do florescimento, vê-se, pela Tabela 15, que praticamente não existem diferenças na produção para intervalos entre irrigações menores do que nove dias. Por outro lado, as irrigações frequentes aumentaram consideravelmente o consumo de água (Figura 20 e Tabelas 5 a 12 e 15), sem aumento proporcional na produção de grãos, acima de 50% de disponibilidade de água no solo.

Tabela 15 - Valores acumulados de irrigação, intervalo médio entre irrigações, produção final de grãos e eficiência no uso da água (EUA), em função dos tratamentos de irrigação na cultura do feijoeiro, em Campinas, SP.

Tratamento	Irrigação	Intervalo	Produção	EUA
	mm	dia	kg/ha	kg/mm/ha
100%AD	270	10	1.882	6,97
75%AD	170	6	1.874	11,02
50%AD	120	9	1.781	14,84
25%AD	100	12	1.540	15,40
DHI	100	18	1.287	12,87
M75%	185	5	2.145	11,59
M50%	130	7	2.041	15,70
DHN	125	10	1.893	15,15

Figura 20 - Produção de grãos do feijoeiro em função da irrigação acumulada nos tratamentos de irrigação.

HALTERLEIN (1983), revendo a literatura sobre irrigação do feijoeiro, encontrou as maiores produções quando a disponibilidade de água no solo foi mantida a 50%. Esse resultado é semelhante ao obtido no presente experimento, visto que as produções entre os tratamentos 100, 75 e 50%AD não diferiram significativamente. Para manter essa disponibilidade hídrica a 50%, KATTAN & FLEMING (1956) afirmam que é necessário uma aplicação semanal de 25 mm de água, da germinação ao início do florescimento, e de 38 mm do florescimento à colheita. Para Kriegbaum (citado por SALTER & GOODE, 1967), em condições de solo com grande armazenamento de água, a irrigação aplicada dez dias antes a dez dias após o florescimento resulta em máxima produção, pelo aumento no número de vagens e de sementes por legume.

Nas condições deste ensaio, a melhor conversão no uso da água, nos tratamentos cobertos, foi alcançada no 25%AD, seguido do 50%AD. A cobertura plástica afetou a eficiência do uso da água, tornando-a um pouco menor quando comparada ao descoberto. A eficiência do uso da água é um critério de seleção de manejo deve ser adotado na situação de limitação de recurso hídrico, quando se deseja maximizar a produção de grãos por unidade de água aplicada (BERNARDO, 1987).

As irrigações mais frequentes do 100%AD aumentaram a taxa de drenagem. A lixiviação ocorrida, porém, parece não ter afetado nutricionalmente nenhum dos tratamentos, conforme a análise foliar aos 67 DAG e o aspecto das plantas até o final do ciclo. Apenas o tratamento DHI revelou alguma redução nos teores de N, P, K e Mg, provavelmente pelo secamento da camada fértil do solo (BATAGLIA, 1980).

O longo período de déficit hídrico imposto no DHI, dos 36 aos 62 DAG, afetou significativamente sua produção. Quando esse período de estresse foi reduzido à metade no 25%AD, a produção aumentou em 20% sem uso adicional de água; no 25%AD, em vez da lâmina de 70 mm aos 62 DAG, necessária para repor a unidade à capacidade de campo no DHI, ela foi subdividida em duas aplicações de 40 e 30mm, respectivamente, aos 50 e 62 DAG.

4.6.2. Relação entre a produção e a evapotranspiração

A relação entre a produção de grãos e a evapotranspiração real acumulada nos tratamentos de irrigação do feijoeiro - Figura 21 - revela dois tipos de comportamento em função da cobertura plástica: enquanto os descobertos apresentaram valores de produção maior e linearmente relacionados com a ETr, os cobertos aproximaram-se de uma função assintótica.

Vários autores encontraram uma relação linear entre a fitomassa produzida e a água transpirada (WIT, 1958; ARKLEY, 1963). Quando a produção de grãos e a evapotranspiração real são proporcionais, respectivamente, à fitomassa e à transpiração, esses elementos também se relacionam linearmente entre si (WIT, 1958; DOWNEY, 1972). No presente trabalho, observou-se uma relação próxima da linear entre a produção de grãos e a ETr acumulada para os tratamentos até 75% de disponibilidade de água, com ou sem cobertura plástica. A ETr acima de 174 mm, promovida pelas irrigações freqüentes após o florescimento, não reverteu em acréscimo na produção de grãos.

Figura 21 - Produção de grãos do feijoeiro em função da evapotranspi-
ração (ET_r) acumulada nos tratamentos de irrigação.

As irrigações freqüentes se deram principalmente quando a cobertura do solo era completa, reduzindo, portanto, a diferença entre a ETr e a transpiração, por minimizar a evaporação direta do solo. Assim, a explicação para a perda de linearidade entre a produção e a ETr não parece ser devida às diferenças entre transpiração e evapotranspiração, mas a duas outras possibilidades. A primeira, ao efeito da cobertura plástica no decréscimo da radiação fotossinteticamente ativa, promovendo queda na produtividade vegetal. A segunda refere-se a que um aumento na fitomassa total pelo incremento da ETr (no 100%AD) possivelmente não tenha correspondido a um proporcional aumento na produção de grãos. Houve, provavelmente, variação no valor do índice de colheita entre os tratamentos, com redução para o irrigado freqüentemente. Outro fator associado à redução da produção de grãos é que o 100%AD teve o seu ciclo alongado, processando-se a colheita com as plantas ainda verdes.

A imposição dos tratamentos pela suspensão das chuvas após 36 DAG parece ter sido cedo o suficiente para afetar o número de estruturas reprodutivas por planta. Na Figura 22 observa-se uma clara limitação da produção em função do número de vagens por planta (e por área), nas parcelas com cobertura plástica. Os tratamentos de disponibilidade de água afetaram visivelmente o porte das plantas, reduzindo-lhes o número de ramificações das hastes onde se desenvolvem as estruturas reprodutivas. O efeito do estresse hídrico antes do florescimento, afetando o número de flores e vagens do feijoeiro, foi relatado na literatura, entre muitos, por ROBINS & DOMINGO (1956), MAGALHÃES & MILLAR (1978) e BULISANI (1987). RAGGI et alii (1977), trabalhando com déficit hídrico em diferentes épocas no ciclo dessa planta, observaram redução na produção em qualquer fase, mesmo que o suprimento de água fosse adequado nos outros períodos.

Figura 22 - Relação entre a produção de grãos do feijoeiro e o número de vagens por área obtida nos tratamentos de irrigação - DHT e de 25 a 100%AD.

Existe similaridade nas relações entre a produção de grãos em função da irrigação acumulada e da ETr acumulada - Figura 21. De fato, a ETr e a irrigação estão linearmente relacionadas ($R^2 = 0,87^{**}$), pois o manejo das irrigações visou à reposição da água evapotranspirada do solo (ARRUDA, 1987). O déficit hídrico imposto, o uso da cobertura plástica e a ocorrência de precipitação no início e no final do ciclo produziram discrepâncias entre os resultados das Figuras 20 e 21 e a linearidade entre ETr e a aplicação de água, especialmente nas baixas produções.

5. CONCLUSÕES

A drenagem profunda representou uma fração importante no balanço hídrico e deve ser levada em consideração no cálculo do momento de irrigação, mesmo para os níveis de secamento mais acentuados.

O feijoeiro mostrou recuperação total na abertura estomática após estresse hídrico, porém não houve pronta recuperação na taxa de transpiração quando o estresse foi severo.

O consumo total de água pela cultura mostrou-se linearmente relacionado à porcentagem de água disponível e à lâmina total de irrigação.

Em condições de alta umidade do solo, o coeficiente de cultura (K_c) foi máximo e relacionado ao desenvolvimento da cultura. Sob estresse moderado, o K_c foi afetado pela resistência estomática e pela demanda evaporativa e, sob estresse severo, principalmente em função da evapotranspiração de referência, visto que a evapotranspiração real variou sistematicamente de 2,2 a 1,2 mm.dia⁻¹, independente da demanda evaporativa.

O efeito da advecção no aumento da evapotranspiração real foi de até 10%, e observado apenas alguns dias durante o ensaio. A razão entre a evapotranspiração e a radiação ($-LE/RN$) variou de 0,67 a 0,93.

Resultados similares de K_c foram obtidos pelos dois métodos - balanço de energia e hídrico de campo - apenas quando foram considerados os seguintes aspectos:

- a) existem diferenças resultantes da duração do período de cálculo de cada método e fatores a ele associados, como a advecção;
- b) as condições de disponibilidade hídrica nos períodos devem ser similares;
- c) a taxa transpiratória após a aplicação de água depende do grau de estresse anterior e do desenvolvimento da cultura; e
- d) há diferenças entre as estimativas da evapotranspiração de referência, por diferentes métodos de cálculo.

A conversão da água aplicada em produção variou de 7 a 16 kg.ha⁻¹ de grãos por milímetro de irrigação, e para valores estacionais de Kc e ETr, de 0,52 a 0,85 e 121 a 213 mm respectivamente.

A relação entre a produção de grãos e a evapotranspiração real não foi tipicamente linear, mas assintótica.

A produção do feijoeiro não aumentou significativamente para intervalos médios de irrigações menores do que nove dias, ou para a manutenção da disponibilidade da água no solo acima de 50%.

As irrigações de alta frequência iniciadas a partir do florescimento não aumentaram a produção da cultura, pela limitação no número de vagens por área estabelecido no período de pré-florescimento, mas elevaram o consumo de água pela cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM NETO, M. da S. & VILLA NOVA, N.A. Novo sistema de medidas de evaporação para o tanque classe "A". *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 18(7):695-702, 1983.
- ARKLEY, R.J. Relationships between plant growth and transpiration. *Hilgardia*, Berkeley, 34:559-584, 1963.
- ARRUDA, F.B. Uso da água na produção agrícola. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1., Campinas, 1987. Anais, ed. por G.P. Viégas. Campinas, Fundação Cargill, 1987. p.177-199.
- BASCUR, G.; OLIVA, M.A.; LAING, D.R. Termometria infrarroja en selección de genótipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) resistentes a sequia. II. Crecimiento y productividad. *Turrialba*, 35(1):49-53, 1985.
- BATAGLIA, O.C. Effects of nitrogen-water relations on maize productivity. Davis, 1980. 182p. (Ph.D. - University of California)
- BEGG, J.E & TURNER, N.C. Crop water deficits. *Advances in Agronomy*, New York, 28:161-217, 1976.

BELCHER, D.J.; CUYKENDALL, T.R; SACK, H.S. The measurement of soil moisture and density by neutron and gamma-ray scattering. Washington, DC, Civil Aeronautical Adm. Sech Div. Rept. 127, DC, 1950.

BERGAMASCHI, H. Perda de água e desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob diferentes condições de disponibilidade hídrica no solo e da atmosfera. Piracicaba, 1984. 204p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

BERNARDO, S. Manual de irrigação. Viçosa, Imprensa Universitária da Universidade Federal de Viçosa, 1987. 463p.

BERNARDO, S.; GALVÃO, J.D.; GUERINI, H.; CARVALHO, J.B. Efeito de níveis de água no solo sobre a produção do feijoeiro. Seiva, Viçosa, 30:7-13, 1970.

BIDINGER, F.R. Water stress effects on crop environment interactions. In: INTERNATIONAL CROP RESEARCH INSTITUTE FOR SEMI-ARID TROPICS, Hyderabad, India, 1978. Proceedings of the International Workshop on the research needs of semi-arid tropics. Hyderabad, India, 1978. p.147-153.

BLACK, C.A. Crop yield in relation to water supply and soil fertility. In: PIERRE, W.R.; KIRKHAM, D.; PESEK, J.; SHAW, R. Plant environment and efficient water use. 4.ed. Wisconsin, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1981. cap 9, p.177-205.

- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Phys. Rev. Ithaca, 27:779-787, 1926.
- BRUNINI, O. Relação entre o potencial da água no solo e nas folhas e a transpiração em mudas de cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2., Pelotas. Pelotas, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/UFPEL, 1981. p.125-129.
- BULISANI, E.A. Feijão: fatores de produção e qualidade. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 326 p.
- BULISANI, E.A. & ROSTON, A.J. Feijão Carioca 80. Campinas, Coordenadoria de Assistência Técnica Integral, 1987. 6p. (Comunicado técnico, 70)
- BURMAN, R.D. & BOLMONT, D.W. Evaluating the growth rate of great Northern beans as influenced by soil moisture level under green house conditions. Agron. J., Madison, 53:354-355, 1961.
- CAIXETA, T.J.; PURCINO, J.R.C.; SILVA, L. Irrigação de algumas culturas. Inf. agropec., 9(100):65-76, 1983.
- CHING CHOY, E.W. & KANEMASU, E.T. Energy balance comparisons of wide and narrow row spacings in sorghum. Agron. J., Madison, 66:98-100, 1974.
- COSTA, A.C.S. Balanço hídrico em culturas de feijão e de milho sob condições de campo. Piracicaba, 1986. 166p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

COWAN, I.R. & MILTHORPE, F.L. Plants factors influencing the water status of plant tissues. In: KOZLOWSKI, T.T., ed. Water deficits and plant grown. New York, Academic Press, 1968. v.1, p.137-193.

DAKER, A. A água na agricultura. In: Irrigação e drenagem. Rio de Janeiro, Livraria Freitas Bastos, 1984. v.3, 543p.

DANG, J.H. Comparison of field and laboratory determined by hydraulic conductivity values. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 44:228-231, 1980.

DOORENBOS, J. & KASSAM, A.H. Yield response to water. Roma, FAO, 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage paper, 33)

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. Crop water requirements. Roma, FAO, 1977. 180p. (FAO Irrigation and Drainage paper, 24)

DOWNEY, L.A. Water-yield relations for nonforage crops. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 98:107-115, 1972.

ENCARNAÇÃO, C.R.F. Estudo da demanda de água do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Goiano precoce. Piracicaba, 1980. 62p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz"/USP)

GARDNER, W.R. Dynamic aspects of water availability to plants. Soil Science, Baltimore, 89:63-73, 1960.

- GARDNER, W.R. Water content. In: BLACK, C.A. Methods of soil analysis. Madison, Amer. Soc. Agron., 1965. p.87-127. (ASA Monograph series, Agronomy, 9)
- GARDNER, W.R. & NIEMANN, R.H. Lower limit of water availability to plants. Science, Washington, 143:1460-1462, 1964.
- GATES, D.M. Biophysical ecology. New York, Springer-Verlag 1980. 611p.
- GIRALT, P.E. Regimen de riego del cultivo de frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.). Ciencia y técnica en la agricultura, Série Riego y Drenage, 2(1):5-28, 1979.
- GUIMARÃES, C.M.; STEINMETZ, S.; PORTES CASTRO, A.T. Uso de microlisímetros na determinação da evapotranspiração do feijoeiro da seca. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 1, Goiânia, 1982. Anais. Goiânia, CNPAF, 1982. p.133-137.
- HAGAN, R.M.; HAISE, H.R.; EDMISTER, T.W. Irrigation of agricultural lands. Madison, American Society of Agronomy, 1967. 1180p. (ASA monograph series, Agronomy, 11)
- HALTERLEIN, A.J. Bean. In: TEARE, I.D.; PEET, M.M. Crop water relations. New York, John Wiley & Sons, 1983. p.157-186.
- HANKS, R.J.; ALLEN, L.H.; GARDNER, H.R. Advection and evapotranspiration of wide row sorghum in Central Great Plains. Agron. J., Madison, 63:520-527, 1971.

HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 413 p.

HILLEL, D. Soil and water. Physical principles and processes. New York, Academic Press, 1971. 288p.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic conductivity in situ. Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison, 114:395-400, 1972.

HORNER, G.M. & MOJTEHERI, N. Yield of grain legumes as affected by irrigation and fertilizer regimes. Agron. J. Madison, 62:449-450, 1970.

HSIAO, T.C. Plant responses to water stress. Ann. Rev. Plant Physiol., Washington, 24:519-570, 1973.

HSIAO, T.C. & ACEVEDO, E. Plant responses to water deficits, water use efficiency and drought resistance. Agric. Meteorol., Amsterdam, 14:59-84, 1974.

HSIAO, T.C.; O'TOOLE, J.C.; TOOMAR, V.S. Water stress as a constraint to crop production in the tropics. Trab. apresentado na conferência: Priorities for alleviating soil-related constraints to food production in the tropics. Los Baños (Philippines), IRRI, 4 a 8 de junho de 1979.

INFORZATO, R. & MIYASAKA, S. Sistema radicular do feijoeiro em dois solos do Estado de São Paulo. Bragan-
tia, Campinas, 22(2):477-482, 1963.

INSTITUTO AGRONÔMICO. Instruções agrícolas para o Estado de São Paulo. Campinas, 1987. 231p. (Boletim 200)

JARVIS, P.G. Water transfer in plants. In: DE VRIES, D.A., ed. Heat and mass transfer in the environment of vegetation. Washington, Scripta, 1975. p.369-394.

JARVIS, P.G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Phil. Trans. R. Soc. Lon, 273:593-610, 1976.

JENSEN, C.R. Influence of water and salt stress on water relationships and carbon dioxide exchange of top and roots in beans. New Phytol., Oxford, 87:285-295, 1981.

JONES, H.G. & HIGGS, K.H. Resistance to water loss from the mesophyll cell surface in plant leaves. J. Exper. Bot., Oxford, 31(121):543-553, 1980.

JONES, J.W.; ZUR, B.; BOOTE, K.J.; HAMMOND, L.C. Plant resistance to water flow in field soybeans. I. Non-limiting soil moisture. Agron. J., Madison, 74:92-105, 1982.

KANEMASU, E.T. & TANNER, C.B. Stomatal diffusion resistance of snap beans. I. Influence of leaf water potential. Plant Physiol., Washington, 44:1547-1552, 1969.

KATTAN, A.A. & FLEMING, J.W. Effect of irrigation at specific stages of development on yield, quality, growth and composition of snap beans. Proc. Soc. Hort. Sci., 68:328-342, 1956.

- KAUFMANN, M.R. Water transport through plants, currents perspectives. In: WARDLAW, I.F. & PASSIOURA, J.B., ed. Transport and transfer processes in plants. New York Academic Press, 1976. 484p.
- KAUFMANN, M.R. & HALL, A.E. Plant water balance - its relationships to atmospheric and edaphic conditions. Agric. meteorol., Amsterdam, 14:85-98, 1974.
- KRETCHMER, P.J.; LAING, D.R.; ZULUAGA, S. Uso del termómetro infrarrojo para la selección por tolerancia a sequia en *Phaseolus vulgaris* L. Cali (Colombia), CIAT, 1980. 10p.
- LAMBERTH, V.N. Some factors influencing pod set and yield of lima beans. Columbia, University of Missouri, 1950. 66p. (Research bulletin, 466)
- LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 44:3-7, 1980.
- LOURENCE, F.J.; PRUITT, W.O.; SERVIS, A. I. Energy balance and the crop water requirements of rice grown in California. Davis, 1970. 44p. (Water Science & Engineering Papers, 9002)
- LUCHIARI JUNIOR, A. Determinação do coeficiente de cultura (Kc) para feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) pelo método do balanço hídrico. Piracicaba, 1978. 59p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

LUCHIARI JUNIOR, A. Measurements and prediction of evapotranspiration rates from irrigated wheat in the cerrado region of Central Brasil. Ithaca, New York, 1988. 171p. (Ph.D. - Cornell University)

McMASTER, G.M.; LEBARON, M.S.; COREY, G.L.; HOWTHORN, L.R.; TOOLE, U.F. The influence of soil moisture on snap bean seed production. Idaho, Agric. Exp. Sta., 1965. (Bull., 435)

MAGALHÃES, A.A. & MILLAR, A.A. Efeito do déficit de água no período reprodutivo sobre a produção de feijão. Pesq. agropec. bras., Brasília, 13(2):55-60, 1978.

MEYER, W.S. & GREEN, G.C. Water use by wheat and plant indicators of available water. Agron. J., Madison, 72:253-257, 1980.

MILLAR, R.A. & GARDNER, W.R. Effect of the soil and plant potentials on the dry matter production of snap beans. Agron. J., Madison, 64:559-562, 1972.

MILLAR, R.A.; JENSEN, R.E.; BAUER, A.; NORUM, E.B. Influence of atmospheric and soil environment parameters on the diurnal fluctuations of leaf water status of barley Agr. Meteorol., Madison, 8:92-105, 1971.

MONTEITH, J.L. Principles of environmental physics. London, Edward Arnold, 1975. 241p.

NIELSEN, D.R.; DAVIDSON, J.M.; BIGGAR, J.W.; MILLER, R.J. Water movement through Parroche Clay Loam soil. Hilgardia, Berkeley, 35:491-506, 1962.

NOBEL, P.S. Introduction to biophysical plant physiology. San Francisco, W.B. Freeman, 1974. 488p.

OGATA, G. & RICHARDS, L.S. Water content changes following irrigations of bare field soil that is protected from evaporation. Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison, 21:355-356, 1957.

OMETTO, J.C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo, Ed. Agrônoma Ceres, 1981. 441p.

PARCEVAUX, S. de. Aspects biophysiques des échanges entre les feuilles e le milieu environnant. Oecologia plantarum, 7(4):371-401, 1972.

PAULA SOUZA, M.L.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L. Perdas de água no solo por drenagem profunda. En. Nucl. Agric., Piracicaba, 1:82-93, 1979.

PEDRO JR., M.J. Balanço de energia em soja (Glicine max (L.) Merry). Piracicaba, 1977. 82p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

PERRIER, A.; ITIER, B.; BERTOLINI, J.M.; BLANCO de PLABOS, A. Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture. Exemples d'application. Ann. Agron. Paris, 26:19-40, 1975.

RAGGI, L.A., BERNARDO, S.; GALVÃO, J.D. Efeito do turno de rega em três fases do ciclo do feijoeiro. Seiva, Viçosa, 32(76):34-43, 1977.

- REICHARDT, K. Parâmetros do solo que influenciam o manejo de água. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1, Campinas, 1987. ANAIS, ed. por G.P. Viégas. Campinas, Fundação Cargill, 1987. p.3-13.
- REICHARDT, K. & LIBARDI, P.L. A new equation for the estimation of soil-water diffusivity. In: SYMPOSIUM ON ISOTOPES AND RADIATION TECHNIQUES IN SOIL PHYSICS AND IRRIGATION STUDIES - IAEA, Viena, 1973. p.45-51.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; NIELSEN, D.R. Unsaturated hydraulic conductivity determination by a scaling technique. Soil Sci., Baltimore, 120(3):165-168, 1975.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SANTOS, J.M. An analysis of soil-water movement in the field. II. Water balance in snap bean crop. Piracicaba, CENA/ESALQ, 1974. 19p. (Boletim Científico, BC-022)
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L.C.V.; CADIMAZ, A. Dinâmica da água em solo cultivado com milho. R. bras. Ci. Solo, Campina, 3:1-5, 1979.
- RESENDE, M.; HENDERSON, D.W.; FERERES, E. Frequência de irrigação, desenvolvimento e produção do feijão kidney. Pesq. agropec. bras., Brasília, 16(3):363-370, 1981.
- RICHARDS, L.A.; GARDNER, W.R.; OGATA, G. Physical processes of determining water loss from soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison, 20:310-314, 1956.
- RITCHIE, J.T. Influence of soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn canopy. Agron. J., Madison, 65:893-897, 1973.

- RITCHIE, J.T. Atmospheric and soil water influences on the plant balance. Agric. Meteorol., Amsterdam, 14: 183-198, 1974.
- RITCHIE, J.T.; BURNETT, E.; HENDERSON, R.C. Dryland evaporative flux in a subhumid climate: III. Soil water influence. Agron. J., Madison, 64:168-176, 1972.
- ROBINS, J.J. & DOMINGO, C.E. Moisture deficits in relation to the growth and development of dry beans. Agron. J., Madison, 48:67-70, 1956.
- ROSE, C.W. Agricultural physics. Oxford, Pergamon Press. 1966. 230p.
- ROSENBERG, N.J. Microclimate: the biological environment. New York, John Wiley & Sons. 1974. 315p.
- ROVIRA, L.A.A. Estudo do sistema radicular do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Carioca. Piracicaba, 1975. 86p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)
- SALTER, P.L. & GOODE, J.E. Crops responses to water at different stages of growth. Bucks, England, Commonwealth Agricultural Bureaux, 1967. 246p. (Research review, 2)
- SANTOS, R. Um estudo das resistências ao transporte de vapor sobre uma cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Piracicaba, 1985. 84p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

- SILVEIRA, P.M. da & STONE, L.F. Balanço de água na cultura do feijão em latossolo vermelho-amarelo. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 14(2):111-115, 1979.
- SIVAKUMAR, M.V.K. & SHAW, R.H. Stomatal conductance and leaf-water potential of soybeans under moisture stress. *J. Iowa State. Journal of Research*, 54(1):17-27, 1979.
- SLATYER, R.O. Plant water relationships. New York, Academic Press, 1967. 366p.
- STANSELL, J.R. & SMITTLE, D.A. Effects of irrigation regimes on yield and water use of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 105(6):869-873, 1980.
- SUTCLIFFE, J. As plantas e a água. (Trad. H.E.T. MACIEL). São Paulo, EPU/EDUSP, 1980. 126 p. (Temas de Biologia, 26)
- TANNER, C.B. Evaporation of water from plants and soil. In: KOLOWSKI, T.T., ed. *Water deficits and plants growth*. New York, Academic Press, 1968. p.74-106.
- THORNTWHAITE, C. W. & MATHER, J.R. The water balance. New Jersey, 1955. 104p. (Publication in Climatology, v.3, n.1)
- TURNER, N.C. & BEGG, J.E. Stomatal behavior and water status of maize, sorghum and tabacco under field conditions. I. At high soil water potential. *Plant Physiol.*, Washington, 51:31-36, 1973.

VILLA NOVA, N.A. Estudos sobre balanço de energia em cultura de arroz. Piracicaba, 1973. 89p. (Livre-docência - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A.R.; PEDRO JUNIOR, M.J. Balanço de energia numa cultura de arroz em condições de sequeiro. Bragantia, Campinas, 34:171-176, 1975.

WIT, C.T. de. Transpiration and crop yields. Wageningen, Institute of Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage, 1958. 88p.

ZUR, B.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J.; HAMMOND, L.C. Total resistance to water flow in field soybeans. II. Limiting soil moisture. Agron. J., Madison, 74:99-105, 1982.

APÊNDICE

Apêndice 1 - Valores médios do gradiente psicrométrico observado ($^{\circ}\text{C}$) e da distribuição dos componentes do balanço de energia ($\text{cal. cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$) para cinco dias típicos (42, 56, 61, 68 e 76 dias após a germinação do feijoeiro, em Campinas.

Apêndice 1.2.b - Resultados do dia 11.9.86 (56 DAG), para o tratamento M75%

Período	T ₂	T ₁	Tu ₂	Tu ₁	ΔTu/ΔT	TuM	$\frac{S + \gamma}{Y}$	RN	G	H	LE	β
h min	°C					°C			cal.cm ⁻² .min ⁻¹			
7 00>	16,06	16,46	14,44	14,94	1,25	14,7	2,72	0,032	-0,014	0,014	0,032	0,416
7 30>	16,79	17,36	14,66	15,36	1,23	15,0	2,75	0,139	-0,009	0,044	0,104	0,420
8 00>	17,02	17,70	15,58	16,35	1,13	16,0	2,85	0,244	0,001	0,075	0,168	0,450
8 30>	17,26	18,05	16,50	17,34	1,06	16,9	2,95	0,398	0,011	0,123	0,264	0,468
9 00>	19,94	20,68	14,56	16,06	2,03	15,3	2,78	0,501	0,016	0,086	0,399	0,216
9 30>	22,62	23,05	14,74	15,47	1,70	15,1	2,76	0,597	0,032	0,120	0,445	0,271
10 00>	23,53	24,11	15,65	16,31	1,14	16,0	2,85	0,666	0,081	0,180	0,405	0,446
10 30>	24,50	25,48	16,89	17,90	1,03	17,4	3,00	0,730	0,085	0,208	0,437	0,477
11 00>	25,65	25,95	17,83	18,20	1,23	18,0	3,07	0,759	0,091	0,176	0,492	0,358
11 30>	24,80	27,57	17,61	19,30	0,61	18,5	3,12	0,793	0,101	0,363	0,329	1,104
12 00>	25,88	27,42	17,99	19,40	0,92	18,7	3,15	0,798	0,104	0,240	0,454	0,530
12 30>	25,78	27,25	18,39	19,50	0,76	18,9	3,18	0,788	0,098	0,287	0,403	0,713
13 00>	26,82	28,33	18,50	19,90	0,93	19,2	3,21	0,760	0,085	0,227	0,448	0,505
13 30>	25,58	27,39	17,70	19,30	0,88	18,5	3,13	0,711	0,068	0,232	0,411	0,566
14 00>	26,15	26,21	17,28	18,66	23,00	18,0	3,07	0,630	0,066	0,008	0,556	0,014
14 30>	28,59	28,81	17,72	19,60	8,55	18,7	3,15	0,561	0,063	0,019	0,479	0,039
15 00>	28,26	29,21	18,91	20,19	1,35	19,6	3,26	0,456	0,047	0,093	0,316	0,295
15 30>	27,51	28,77	18,43	19,90	1,17	19,2	3,21	0,335	0,033	0,081	0,221	0,364
16 00>	27,12	28,42	18,40	19,70	1,00	19,1	3,19	0,225	0,017	0,065	0,143	0,456
16 30>	26,64	27,02	18,30	19,00	1,84	18,7	3,15	0,104	0,009	0,016	0,079	0,208
17 00>	25,40	25,36	18,20	18,60	-10,00	18,4	3,12	-0,010	0,003	0,000	-0,013	-0,031
17 30>	23,10	21,86	18,00	17,10	0,73	17,6	3,02	-0,058	-0,004	-0,025	-0,029	0,839
18 00>	20,24	19,15	17,90	16,50	1,28	17,2	2,98	-0,101	-0,013	-0,023	-0,065	0,353
18 30>	18,09	18,30	16,67	16,03	-3,05	16,4	2,89	-0,097	-0,019	0,009	-0,087	-0,102

Apêndice 1.3.a - Resultados do dia 16.9.86 (61 DAG), para o tratamento 100%AD

Período	T ₂	T ₁	Tu ₂	Tu ₁	$\Delta T_u / \Delta T$	TuM	$\frac{S + \gamma}{Y}$	RN	G	H	LE	β
h min	°C				°C		cal.cm ⁻² .min ⁻¹					
7 00	17,02	17,92	15,08	15,80	0,80	15,4	2,79	0,052	-0,012	0,029	0,035	0,812
7 30	17,02	17,92	15,08	15,80	0,80	15,4	2,79	0,052	-0,012	0,029	0,035	0,812
7 30	18,45	18,98	16,10	16,60	0,94	16,4	2,89	0,180	-0,006	0,068	0,118	0,582
8 00	18,45	18,98	16,10	16,60	0,94	16,4	2,89	0,180	-0,006	0,068	0,118	0,582
8 00	19,52	19,90	17,09	17,39	0,79	17,2	2,99	0,250	0,008	0,102	0,140	0,734
8 30	19,52	19,90	17,09	17,39	0,79	17,2	2,99	0,250	0,008	0,102	0,140	0,734
8 30	21,62	21,68	17,58	18,95	22,83	18,3	3,10	0,340	0,019	0,005	0,316	0,014
9 00	21,62	21,68	17,58	18,95	22,83	18,3	3,10	0,340	0,019	0,005	0,316	0,014
9 00	23,51	24,05	17,39	19,62	4,13	18,5	3,13	0,435	0,027	0,032	0,376	0,084
9 30	23,51	24,05	17,39	19,62	4,13	18,5	3,13	0,435	0,027	0,032	0,376	0,084
9 30	25,49	26,37	18,54	20,18	1,86	19,4	3,23	0,579	0,069	0,085	0,425	0,200
10 00	25,49	26,37	18,54	20,18	1,86	19,4	3,23	0,579	0,069	0,085	0,425	0,200
10 00	27,47	26,50	18,72	20,77	-2,11	19,7	3,28	0,646	0,081	-0,081	0,646	-0,126
10 30	27,47	26,50	18,72	20,77	-2,11	19,7	3,28	0,646	0,081	-0,081	0,646	-0,126
10 30	28,32	27,64	18,35	21,11	-4,06	19,7	3,28	0,672	0,082	-0,044	0,634	-0,070
11 00	28,32	27,64	18,35	21,11	-4,06	19,7	3,28	0,672	0,082	-0,044	0,634	-0,070
11 00	28,84	27,29	18,81	21,52	-1,75	20,2	3,34	0,683	0,078	-0,103	0,708	-0,146
11 30	28,84	27,29	18,81	21,52	-1,75	20,2	3,34	0,683	0,078	-0,103	0,708	-0,146
11 30	29,86	28,44	19,05	22,20	-2,22	20,6	3,38	0,679	0,073	-0,081	0,687	-0,118
12 00	29,86	28,44	19,05	22,20	-2,22	20,6	3,38	0,679	0,073	-0,081	0,687	-0,118
12 00	30,01	28,96	19,45	22,29	-2,70	20,9	3,41	0,652	0,090	-0,061	0,623	-0,098
12 30	30,01	28,96	19,45	22,29	-2,70	20,9	3,41	0,652	0,090	-0,061	0,623	-0,098
12 30	30,88	29,78	19,48	22,30	-2,56	20,9	3,41	0,618	0,074	-0,062	0,606	-0,103
13 00	30,88	29,78	19,48	22,30	-2,56	20,9	3,41	0,618	0,074	-0,062	0,606	-0,103
13 00	31,51	30,60	19,30	22,65	-3,68	21,0	3,42	0,527	0,059	-0,037	0,505	-0,074
13 30	31,51	30,60	19,30	22,65	-3,68	21,0	3,42	0,527	0,059	-0,037	0,505	-0,074
13 30	32,05	30,97	19,37	22,37	-2,78	20,9	3,41	0,452	0,066	-0,040	0,426	-0,095
14 00	32,05	30,97	19,37	22,37	-2,78	20,9	3,41	0,452	0,066	-0,040	0,426	-0,095
14 00	31,58	30,01	18,79	21,60	-1,79	20,2	3,34	0,372	0,056	-0,053	0,369	-0,143
14 30	31,58	30,01	18,79	21,60	-1,79	20,2	3,34	0,372	0,056	-0,053	0,369	-0,143
14 30	31,16	29,89	19,33	21,82	-1,96	20,6	3,38	0,283	0,041	-0,036	0,278	-0,131
15 00	31,16	29,89	19,33	21,82	-1,96	20,6	3,38	0,283	0,041	-0,036	0,278	-0,131
16 00	29,58	29,00	18,93	20,84	-3,29	19,9	3,30	0,106	0,018	-0,008	0,096	-0,084
16 30	29,58	29,00	18,93	20,84	-3,29	19,9	3,30	0,106	0,018	-0,008	0,096	-0,084
16 30	28,29	27,52	19,75	22,06	-3,00	20,9	3,43	0,034	0,016	-0,002	0,020	-0,088
17 00	28,29	27,52	19,75	22,06	-3,00	20,9	3,43	0,034	0,016	-0,002	0,020	-0,088
17 00	25,13	21,66	18,09	20,16	-0,60	19,1	3,20	-0,023	0,007	0,016	-0,046	-0,343
17 30	25,13	21,66	18,09	20,16	-0,60	19,1	3,20	-0,023	0,007	0,016	-0,046	-0,343
17 30	23,23	20,06	17,52	18,28	-0,24	17,9	3,06	-0,063	0,000	0,086	-0,149	-0,577
18 00	23,23	20,06	17,52	18,28	-0,24	17,9	3,06	-0,063	0,000	0,086	-0,149	-0,577
18 00	22,07	20,76	17,35	16,28	0,82	16,8	2,94	-0,062	-0,006	-0,023	-0,033	0,714
18 30	22,07	20,76	17,35	16,28	0,82	16,8	2,94	-0,062	-0,006	-0,023	-0,033	0,714
18 30	23,54	21,70	18,06	17,24	0,45	17,7	3,03	-0,082	-0,008	-0,055	-0,019	2,848
19 00	23,54	21,70	18,06	17,24	0,45	17,7	3,03	-0,082	-0,008	-0,055	-0,019	2,848

- Apêndice 1.5.a - Resultados do dia 1.10.86, para o tratamento 100%AD

Período	T ₂	T ₁	Tu ₂	Tu ₁	ΔTu/ΔT	TuM	$\frac{S + \gamma}{\gamma}$	RN	G	H	LE	β
h min	°C				°C		cal.cm ⁻² .min ⁻¹					
7 00>	16,21	16,48	13,61	13,80	1,13	13,7	2,63	0,187	-0,003	0,065	0,125	0,514
7 30>	17,22	17,34	14,55	14,77	1,83	14,8	2,73	0,296	0,004	0,058	0,234	0,250
8 00>	18,13	18,55	15,20	16,10	2,14	15,6	2,81	0,416	0,010	0,067	0,339	0,199
8 30>	18,90	19,59	15,53	16,60	1,55	16,1	2,86	0,500	0,027	0,107	0,366	0,291
9 00>	20,87	22,34	16,71	19,50	1,90	18,1	3,08	0,647	0,036	0,104	0,507	0,206
9 30>	22,28	23,58	17,00	20,21	2,47	18,6	3,14	0,716	0,044	0,087	0,585	0,148
10 00>	23,70	23,81	17,40	21,56	37,82	19,5	3,25	0,799	0,056	0,006	0,737	0,008
10 30>	25,63	25,34	18,03	22,08	-13,97	20,1	3,32	0,844	0,057	-0,017	0,804	-0,021
11 00>	25,46	26,23	18,28	23,35	6,58	20,8	3,42	0,869	0,057	0,036	0,776	0,047
11 30>	26,25	27,74	18,50	24,09	3,75	21,3	3,48	0,922	0,058	0,066	0,798	0,083
12 00>	27,08	27,85	18,06	23,66	7,27	20,9	3,42	0,895	0,055	0,034	0,806	0,042
12 30>	25,37	26,92	18,15	22,33	2,70	20,2	3,34	0,869	0,054	0,090	0,725	0,125
13 00>	26,83	27,38	18,86	22,70	6,98	20,8	3,41	0,853	0,056	0,033	0,764	0,044
13 30>	25,81	26,23	18,78	22,16	8,05	20,5	3,37	0,474	0,044	0,016	0,414	0,038
14 00>	25,12	25,57	18,26	21,39	6,96	19,8	3,29	0,562	0,024	0,024	0,514	0,046
14 30>	26,04	25,89	18,45	21,01	-17,07	19,7	3,28	0,562	0,024	-0,010	0,548	-0,018
15 00>	25,99	25,36	18,16	20,55	-3,79	19,4	3,23	0,424	0,020	-0,033	0,437	-0,075
15 30>	25,49	23,03	17,20	20,28	-1,25	18,7	3,16	0,256	0,013	-0,061	0,304	-0,202
16 00>	24,66	22,95	17,15	19,88	-1,60	18,5	3,13	0,149	0,009	-0,028	0,168	-0,166
16 30>	24,55	23,49	17,21	20,11	-2,64	18,6	3,14	0,154	0,007	-0,018	0,165	-0,108
17 00>	23,50	21,21	16,80	17,43	-0,28	17,1	2,97	0,036	0,002	-0,041	0,075	-0,546
17 30>	20,63	19,87	16,70	16,35	0,46	16,5	2,91	-0,049	-0,011	-0,028	-0,010	2,940
18 00>	19,28	18,49	16,88	16,58	0,38	16,7	2,93	-0,089	-0,015	-0,067	-0,007	8,818
18 30>	19,10	17,66	15,78	15,09	0,48	15,4	2,79	-0,097	-0,020	-0,057	-0,020	2,948

Apêndice 1.5.b - Resultados do dia 1.10.86, para o tratamento M75%

Período	T ₂	T ₁	Tu ₂	Tu ₁	ΔTu/ΔT	TuM	$\frac{S + \gamma}{\gamma}$	RN	G	H	LE	β
h min	°C				°C		cal.cm ⁻² .min ⁻¹					
7 00>	16,48	16,79	14,22	15,01	2,55	14,6	2,71	0,187	-0,003	0,027	0,163	0,169
7 30>	17,51	17,72	15,01	15,32	1,48	15,2	2,77	0,296	0,004	0,071	0,221	0,323
8 00>	18,03	18,36	15,12	16,01	2,70	15,6	2,81	0,416	0,010	0,054	0,352	0,152
8 30>	18,40	18,96	15,49	16,10	1,09	15,8	2,83	0,500	0,027	0,155	0,320	0,480
9 00>	19,60	20,23	15,43	16,67	1,97	16,1	2,86	0,647	0,036	0,109	0,502	0,216
9 30>	21,70	22,19	16,25	17,43	2,41	16,8	2,94	0,716	0,044	0,095	0,577	0,164
10 00>	21,83	22,02	18,39	19,25	4,53	18,8	3,17	0,799	0,056	0,052	0,691	0,075
10 30>	24,53	24,50	18,75	19,32	-19,00	19,0	3,19	0,844	0,057	-0,013	0,800	-0,016
11 00>	24,52	24,21	18,04	19,06	-3,29	18,6	3,14	0,869	0,057	-0,079	0,891	-0,088
11 30>	26,92	26,39	17,55	20,20	-5,00	18,9	3,17	0,922	0,058	-0,054	0,918	-0,059
12 00>	27,56	27,04	17,34	20,02	-5,15	18,7	3,15	0,907	0,055	-0,052	0,904	-0,058
12 30>	26,94	26,20	17,43	20,42	-4,04	18,9	3,18	0,895	0,060	-0,065	0,900	-0,072
13 00>	26,59	26,37	16,54	17,28	-3,36	16,9	2,95	0,869	0,054	-0,082	0,897	-0,092
13 30>	26,72	27,19	17,60	19,04	3,06	18,3	3,11	0,853	0,056	0,084	0,713	0,117
14 00>	25,13	25,91	16,96	18,95	2,55	18,0	3,07	0,474	0,044	0,055	0,375	0,147
14 30>	27,62	28,27	17,28	19,89	4,02	18,6	3,14	0,562	0,024	0,043	0,495	0,086
15 00>	25,51	25,75	17,47	18,86	5,79	18,2	3,09	0,424	0,020	0,023	0,381	0,059
15 30>	25,70	26,02	17,14	19,31	6,78	18,2	3,10	0,256	0,013	0,012	0,231	0,050
16 00>	25,14	24,71	17,01	17,77	-1,77	17,4	3,00	0,149	0,009	-0,026	0,166	-0,159
16 30>	26,31	26,98	16,93	18,24	1,96	17,6	3,02	0,154	0,007	0,025	0,122	0,204
17 00>	24,28	23,26	17,88	18,04	-0,16	18,0	3,07	0,036	0,002	-0,071	0,105	-0,675
17 30>	20,89	20,37	16,89	18,50	-3,10	17,7	3,04	-0,049	-0,011	0,004	-0,042	-0,096
18 00>	19,89	19,13	16,17	15,31	1,13	15,7	2,83	-0,089	-0,015	-0,023	-0,051	0,455
18 30>	18,90	18,44	15,74	15,45	0,63	15,6	2,82	-0,097	-0,020	-0,043	-0,034	1,288