

PEDRO MARQUES DA SILVEIRA
LUIS FERNANDO STONE

MANEJO DA IRRIGAÇÃO DO FEIJOEIRO: USO DO TENSIOMETRO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PIVÔ CENTRAL



**MANEJO DA IRRIGAÇÃO DO FEIJOEIRO:
USO DO TENSÍMETRO E AVALIAÇÃO
DO DESEMPENHO DO PIVÔ CENTRAL**

Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA

Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão - CNPAF

Goiânia, GO

MANEJO DA IRRIGAÇÃO DO FEJJOEIRO: USO DO TENSÍMETRO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PIVÔ CENTRAL

Pedro Marques da Silveira

Luis Fernando Stone

EMBRAPA-SPI

Brasília, DF

1994

EMBRAPA-CNPAF. Circular Técnica, 27.

Comitê de Publicações do CNPAF

Pedro Antonio Arraes Pereira (Presidente)



Assessoria Técnico-Científica

Jorge Luiz do Nascimento (Universidade Federal de Goiás)

Juscelino Antonio de Azevedo (EMBRAPA/Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado)

Editoração e Programação Visual

Marina Biava (Coordenação)

Fabiano Severino

Lauro Pereira da Mota

Sebastião José de Araújo

Sinábio de Sena Ferreira

Normatização Bibliográfica

Ana Lúcia D. de Faria

Tiragem: 2000 exemplares.

SILVEIRA, P.M. da; STONE, L.F. **Manejo da irrigação do feijoeiro: uso do tensiômetro e avaliação do desempenho do pivô central.** Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 46p. (EMBRAPA-CNPAF. Circular Técnica, 27).

ISSN 0100-8382.

1. Feijão - Irrigação - Pivô Central. 2. Feijão - Irrigação - Tensiômetro. 3. Feijão - Irrigação - Manejo. I. STONE, L.F., colab. II. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (Goiânia, GO). III. Título. IV. Série.

CDD 635.65287

©EMBRAPA, 1994

APRESENTAÇÃO

Com o grande incentivo governamental dado à irrigação no início da década de 80, a cultura do feijoeiro vem ocupando lugar de destaque no Brasil Central como uma das principais alternativas para o plantio de entressafra (de abril a julho).

A cultura plantada nessa época normalmente é mais tecnificada, utilizando-se, além da irrigação, feita principalmente por aspersão via pivô central, outros insumos como semente de boa qualidade, adubos e defensivos. Com isso, são obtidos rendimentos quatro a seis vezes superiores à média nacional.

Até pouco tempo, entretanto, os agricultores não se tinham mostrado sensíveis a melhorar o manejo da irrigação, devido, possivelmente, ao baixo custo da água em relação ao das práticas que maximizariam a eficiência da irrigação. A elevação do custo da energia e a redução da produtividade das lavouras de feijão, causada pela ocorrência de doenças, mal manejo do solo, entre outros fatores, e agravada pelo manejo inadequado da irrigação, têm alertado os agricultores para a importância de controlar corretamente a irrigação.

Esta publicação reúne um conjunto de informações de utilidade para os agentes de assistência técnica e produtores que desejem manejar adequadamente a irrigação e fazer uma avaliação do desempenho do pivô central.

Homero Aidar
Chefe do CNPAF

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. TENSÍOMETRO (Quando Irrigar)	9
2.1. CONSTITUIÇÃO DO APARELHO	9
2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	10
2.3. INTERPRETAÇÃO DAS LEITURAS	11
2.4. TESTE DO TENSÍOMETRO	12
2.5. INSTALAÇÃO NO CAMPO	13
2.6. POSIÇÃO JUNTO ÀS PLANTAS E PROFUNDIDADES DE INSTALAÇÃO	14
2.7. NÚMERO DE BATERIAS E LOCAIS DE INSTALAÇÃO	15
2.8. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	17
2.9. VALOR DA LEITURA PARA IRRIGAÇÃO	19
2.10. DEFEITOS, FALHAS DE FUNCIONAMENTO E MEDIDAS DE CORREÇÃO	21
3. CURVA DE RETENÇÃO (Quanto Irrigar)	22
3.1. CARACTERIZAÇÃO	22
3.2. CÁLCULO DA LÂMINA DE IRRIGAÇÃO	23
3.3. COLETA DO SOLO PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO	24
4. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PIVÔ CENTRAL	27
4.1. DETERMINAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA	27
4.2. DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DE ÁGUA	38
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

MANEJO DA IRRIGAÇÃO DO FEIJOEIRO: USO DO TENSÍOMETRO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PIVÔ CENTRAL

Pedro Marques da Silveira¹

Luis Fernando Stone¹

1. INTRODUÇÃO

O manejo adequado da irrigação na cultura do feijoeiro, em áreas irrigadas por aspersão pelo sistema pivô central, consiste em fornecer água ao solo no momento oportuno (**quando irrigar**) e na quantidade suficiente (**quanto irrigar**) para atender a necessidade hídrica da planta. Pode-se dizer que este manejo tem os seguintes objetivos:

- **Maximizar a produtividade da cultura:** de modo geral, déficits de água, em qualquer fase do desenvolvimento da planta, contribuem para reduzir o rendimento final da cultura e, até certos limites, tem-se verificado que este rendimento aumenta com o aumento da quantidade de água aplicada ao solo.
- **Minimizar o uso de água e custo de energia:** há um gasto adicional de água e de energia se se irriga além das necessidades hídricas da planta. A água pode-se tornar um fator limitante e de conflitos em certas áreas de concentração de irrigação. O custo mensal de energia é proporcional à potência do conjunto moto-bomba, ao preço unitário da energia (elétrica ou diesel) e às horas de funcionamento do equipamento. Destas variáveis, a única que o irrigante tem domínio são as horas de funcionamento do equipamento durante o mês.
- **Aumentar a eficiência de adubos:** é sabido que a eficiência do adubo nitrogenado e, principalmente do fósforo, o qual se move por difusão, é maior em maiores conteúdos de água do solo.
- **Diminuir a incidência de doenças:** tem-se observado um aumento de doenças, causadas principalmente por fungos de solo, com aplicações excessivas de água no solo durante o ciclo da cultura.

¹ Pesquisador, Dr., EMBRAPA/Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAP), Caixa Postal 179, CEP 74001-9070, Goiânia - GO

Manter ou melhorar as condições químicas e físicas do solo: lixiviação de nutrientes, desagregação e erosão do solo podem ocorrer se a irrigação não for eficiente e/ou se o equipamento for mal dimensionado.

Entretanto, apesar de todos estes benefícios, a maioria dos produtores de feijão irrigado não dá a devida importância ao manejo da irrigação. Várias causas podem ser citadas para explicar tal atitude:

- **Custo da água:** o insumo água nada custa ao produtor irrigante.
- **Custo da energia elétrica:** ao contrário do que muitos irrigantes argumentam, o custo da energia elétrica não é tão alto, e gira em torno de 10% do custo total de produção.
- **Carência de dados edafoclimáticos:** o irrigante não dispõe de análises físico-hídricas do solo e de dados climatológicos para o manejo da irrigação.
- **Prioridade das atividades:** o produtor, no seu dia a dia, preocupa-se mais com o seu calendário de aplicação de adubos, com um possível surgimento de doenças e pragas e com o desenvolvimento da cultura em campo.
- **Técnico e/ou consultoria especializada:** a assistência técnica do produtor não fornece as opções de manejo da irrigação, por desconhecimento ou por falta de interesse.
- **Metodologia:** embora disponível, ainda não foi apresentada aos produtores de forma acessível, de modo que facilite a sua adoção.

Assim, esta circular técnica se propõe a levar ao produtor de feijão irrigado, pelo sistema pivô central, as informações necessárias para o manejo da irrigação, de maneira simples e prática, usando **tensiômetros de solo**, na determinação do momento da irrigação. Definido o quando irrigar pelo tensiômetro, vem uma outra questão: quanto de água aplicar? Dentro do mesmo princípio de simplicidade e praticidade, a **curva de retenção de água do solo**, uma propriedade físico-hídrica avaliada em laboratório, será usada para responder esta pergunta.

Definido o momento e a quantidade de água a aplicar, o irrigante passa a depender do desempenho e das características do seu equipamento de irrigação. A má performance do pivô central, quanto a uniformidade de distribuição de água, a aplicação de lâminas d'água diferentes da que lhe foi solicitada, baseada nas informações contidas no catálogo do fabricante, diminui a eficiência do manejo. Como avaliar o seu equipamento de irrigação em campo, para fins de manejo, é outra questão abordada neste documento.

2. TENSIÔMETRO (Quando Irrigar)

2.1. CONSTITUIÇÃO DO APARELHO

O tensiômetro é constituído por um tubo plástico, de comprimento variável, em cuja extremidade inferior tem uma cápsula de porcelana porosa. É fechado hermeticamente na extremidade superior, onde se encontra um manômetro de mercúrio ou um vacuômetro metálico tipo Bourdon, como elemento indicador do vácuo existente dentro do aparelho, quando em operação. As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, as partes componentes de um tensiômetro de vacuômetro metálico e de um manômetro de mercúrio.

O vacuômetro metálico é calibrado, geralmente, em centibar ou em mmHg (milímetro de mercúrio), mas os valores de tensão podem ser dados também em centímetros de água, bar e Pascal (Pa), de acordo com as relações:

$$1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg} = 1033 \text{ cm H}_2\text{O} = 1,013 \text{ bar} = 101,3 \text{ Kpa}$$

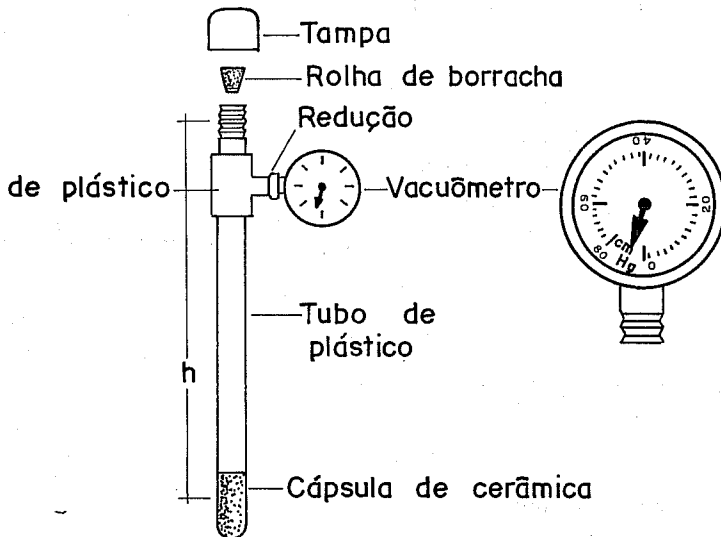


FIG. 1. Partes componentes de um tensiômetro com vacuômetro metálico.

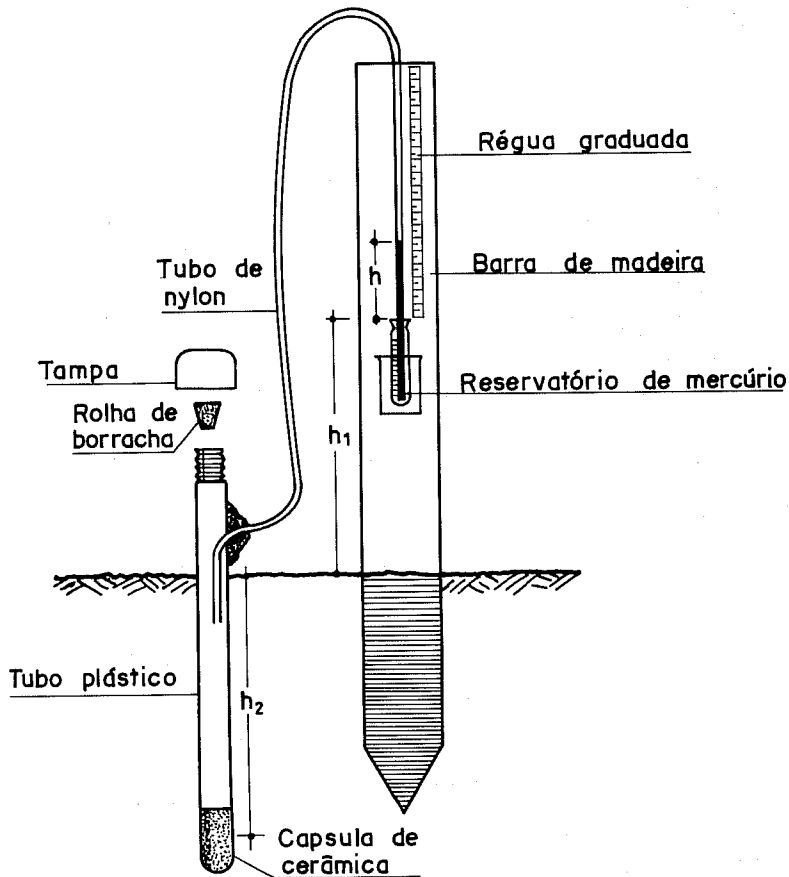


FIG. 2. Partes componentes de um tensiômetro com manômetro de mercúrio.

2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A força de atração das moléculas de água pelas partículas do solo é denominada tensão de água do solo ou potencial matricial. Quando o solo está cheio d'água, esta atração ou tensão é baixa e, à medida que o solo seca, a força de retenção cresce. Ao se instalar um tensiômetro no solo, há uma tendência de equilíbrio entre a água do solo e a água do aparelho através da cápsula. A água do

solo, estando sob tensão, exerce uma sucção sobre o aparelho e dele retira certa quantidade de água causando a queda de sua pressão interna (vácuo), a qual é detectada pelo vacuômetro metálico ou pelo de mercúrio (Reichardt, 1978). Quanto mais seco o solo, maior será o vácuo produzido.

Quando ocorre chuva ou irrigação, a tensão de água do solo diminui e ocorre o movimento inverso de água, do solo para o aparelho, diminuindo o vácuo existente, e, conseqüentemente, a leitura do tensiômetro (Faria & Costa, 1987).

2.3. INTERPRETAÇÃO DAS LEITURAS

O tensiômetro mede diretamente a tensão de água e indiretamente a porcentagem de água do solo. Valores baixos indicam solo úmido e valores altos indicam solo seco.

De acordo com Faria & Costa (1987), a tensão de água, determinada no tensiômetro, está diretamente relacionada com a facilidade ou dificuldade de absorção de água pelas raízes das plantas. Isto porque, para que ocorra a absorção, é necessário que as raízes exerçam uma tensão maior do que aquela que a água do solo está submetida. Deste modo, o solo úmido resulta em baixa tensão de água, o que, por conseguinte, facilita a absorção pela planta. Em solo seco, com maior tensão de água, a planta precisa exercer uma alta tensão para extrair água. Para a existência desta condição, há necessidade de rebaixamento do conteúdo de água na planta, muitas vezes implicando em déficit hídrico, que provôca decréscimo de produtividade da cultura.

O tensiômetro só tem capacidade para leituras de tensão até 0,80 bar. Para tensões maiores do que esta, entra ar nos poros da cápsula de cerâmica e o aparelho pára de funcionar. Sendo assim, ele cobre somente uma parte da água disponível do solo. Entretanto, em latossolos dos cerrados, o tensiômetro cobre 65% ou mais da água disponível do mesmo (Azevedo et al., 1983).

Para o feijão, uma leitura de 0-0,1 bar indica um solo muito úmido para a cultura. Leituras entre 0,1 a 0,3-0,4 bar representam condições ideais de água e arejamento do solo. À medida que as leituras ultrapassam 0,4 bar, a água começa a tornar-se limitante para a cultura, principalmente em regiões de alta demanda atmosférica.

A tensão no vacuômetro (Figura 1) é calculada pela seguinte equação:

$$T_s = 0,01 (L - 0,098h) \dots\dots\dots (1)$$

onde: T_s = tensão da água do solo, expressa em bar; L = leitura do vacuômetro, em centíbar; h = altura da coluna d'água dentro do tubo, em cm.

Quando se utiliza o tensiômetro de mercúrio (Figura 2), a tensão da água do solo (T_s), em bar, é calculada pela altura (h) da coluna de mercúrio (cm), pela altura do nível do mercúrio no recipiente ao solo (h_1 , em cm) e pela profundidade de instalação do tensiômetro (h_2 , em cm), usando a equação:

$$T_s = \frac{12,6h - h_1 - h_2}{1020} \dots\dots\dots (2)$$

2.4. TESTE DO TENSIOMETRO

O fabricante do tensiômetro tem a responsabilidade de testá-lo previamente quanto a pressão de borbulhamento e a condutância de água da cápsula. A pressão de borbulhamento é a pressão mínima sob a qual o ar borbulha através da cápsula saturada. Faz-se o teste, conectando-se a cápsula a uma fonte de ar de pressão regulável. Em seguida, ela é colocada na água, quando são feitos incrementos de 0,1 bar até saírem bolhas, atingindo-se a pressão de borbulhamento. Consideram-se de boa pressão de borbulhamento valores de 1 a 1,5 bar (Klar, 1991). Cápsulas que apresentarem valores menores do que 0,8 bar devem ser descartadas.

Na propriedade agrícola, cada aparelho deve ser testado e preparado antes de ser levado a campo.

O tensiômetro deixa de funcionar se apresentar vazamento de ar no seu interior. Por isto, devem ser verificadas as junções da cápsula, do manômetro e da tampa com o tubo, com o aparelho dentro d'água, aplicando-se ar sob pressão com uma bomba manual, para localizar o ponto de vazamento. Essa bomba manual pode ser uma seringa de plástico de 50 cm³ de capacidade, firmemente ligada por uma pequena e fina mangueira de plástico a uma rolha de borracha, vazada pela mesma mangueira. Essa rolha de borracha tem as mesmas dimensões da tampa do tensiômetro, para permitir a ligação.

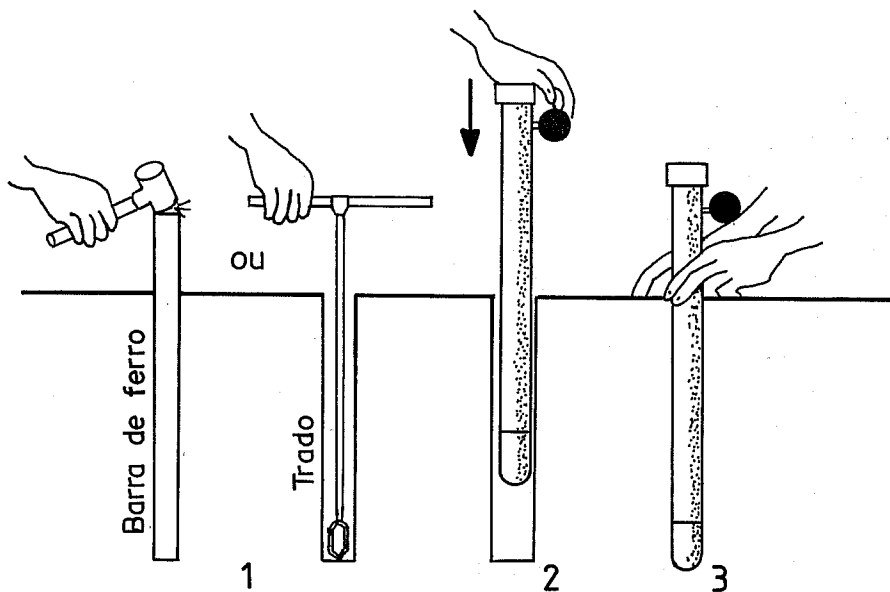
O aparelho, após testado contra vazamento de ar, é cheio de água fervida e fria e colocado dentro d'água por um a dois dias. Para retirar as bolhas de ar que porventura estejam presas na cápsula, faz-se, em seguida, a sucção, com o auxílio da seringa. Bate-se levemente no tubo para ajudar a remoção de bolhas, completa-se a água, se necessário, tampa-se o tubo, colocando-o, por fim, ao ar livre para que evapore água. De acordo com Azevedo et al. (1986), após cinco a oito horas,

o manômetro deverá registrar 50 ou mais centibar sem que haja demasiado acúmulo de ar no topo do tensiômetro. Em locais e épocas mais secos, de baixa umidade relativa, este tempo pode ser menor. Ainda segundo aqueles autores, pode ser realizado um teste adicional para complementar o anterior. Para tanto, veda-se a cápsula dentro de um pequeno saco plástico, quando o mostrador indicar leituras entre 40 e 70 centibar. Se a leitura no próximo dia variar da do dia anterior, até o máximo de cinco unidades, o tensiômetro está em boas condições de uso. Se a variação for maior, pode estar ocorrendo algum vazamento, que deverá ser localizado. Caso contrário, retira-se o saco plástico envolvente da cápsula e coloca-se o aparelho dentro de um balde com água, de modo que cubra somente a cápsula. Feito isso, o aparelho está pronto para ser levado para o campo.

2.5. INSTALAÇÃO NO CAMPO

O tensiômetro deve ser instalado na lavoura de feijão após a emergência das plantas e depois de três a quatro irrigações, quando o solo já se encontra com umidade suficiente para funcionamento do aparelho.

Com o auxílio de um cano de ferro ou de um trado do mesmo diâmetro do tubo do tensiômetro, faz-se um buraco até a profundidade desejada. Em seguida, introduz-se o tensiômetro, tendo o cuidado para que haja bom contato entre a cápsula e o solo. A adição de um pouco de terra solta e água dentro do buraco ajuda a melhorar este contato. Deve-se ter o cuidado para não empurrar o tensiômetro apoiando-se no vacuômetro metálico. A cápsula merece cuidados especiais, pois é o ponto mais frágil do aparelho. Nunca se deve segurar o tensiômetro pela cápsula. Após atingir a profundidade de instalação, coloca-se um pouco de terra ao redor do tubo, comprimindo-se levemente, para evitar que a água de irrigação alcance a cápsula pelo espaço deixado entre o tubo e o solo. A Figura 3 mostra as operações para a instalação do aparelho no campo.



1- Abertura do buraco 2- Inserção do tensiômetro 3- Acabamento

FIG. 3. Seqüência de instalação do tensiômetro no solo.

2.6. POSIÇÃO JUNTO ÀS PLANTAS E PROFUNDIDADES DE INSTALAÇÃO

O tensiômetro deve ser instalado entre as fileiras de plantas de feijão e em duas profundidades, uma a 15 cm e outra a 30 cm, lado a lado, cujo conjunto forma uma bateria. A profundidade é medida a partir da metade da cápsula. A leitura do tensiômetro de 15 cm representa a tensão média de um perfil de solo de 0-30 cm de espessura, o qual engloba a quase totalidade das raízes do feijoeiro. Este tensiômetro é chamado tensiômetro de decisão (Saad & Libardi, 1992), porque indica o momento da irrigação (quando irrigar). Já o tensiômetro instalado a 30 cm é chamado tensiômetro de controle, porque verifica se a irrigação está sendo bem feita, para que não haja excesso ou falta de água. A Figura 4 mostra a posição dos dois tensiômetros junto às plantas de feijão. Ao lado da bateria dos tensiômetros, deve ser instalado um pluviômetro, a cerca de 1,0 m de altura. Este pluviômetro servirá para coleta da água de irrigação do pivô central ou da chuva e, também, como referência para localização dos tensiômetros no campo.

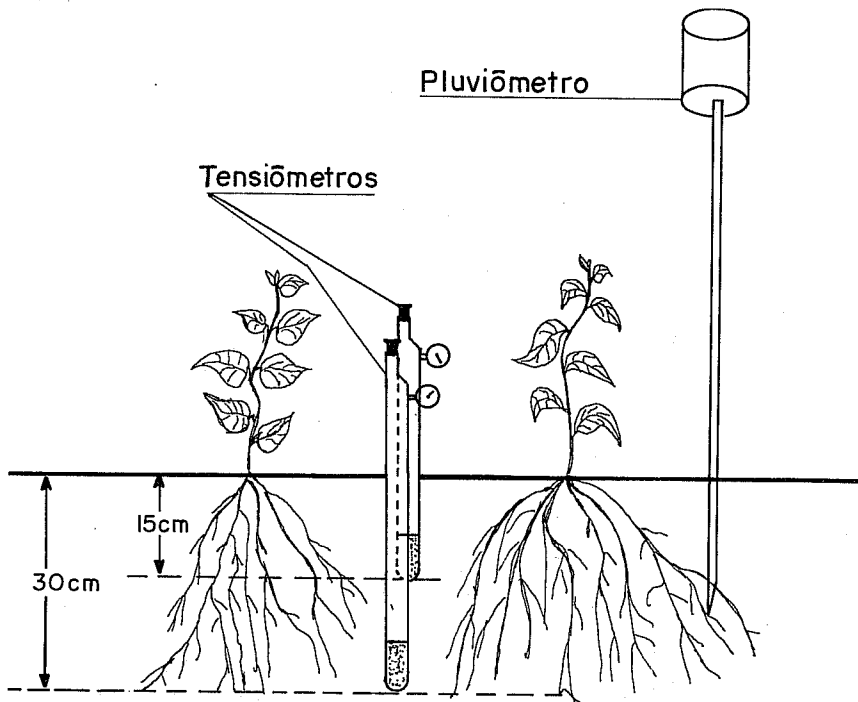


FIG. 4. Posição dos tensiômetros junto às plantas e profundidades de instalação.

2.7. NÚMERO DE BATERIAS E LOCAIS DE INSTALAÇÃO

Devem ser instaladas três baterias de tensiômetros na área irrigada. Depois de numeradas, devem ser posicionadas, respectivamente, a uma distância equivalente a $4/10$, $7/10$ e $9/10$ do raio do pivô, em linha reta a partir da base (Silveira & Stone, 1994). Nesta localização, cada bateria representa, aproximadamente, 33,3% da área irrigada do pivô central. O esquema de instalação no campo é apresentado na Figura 5, onde se pode observar que o pivô central, movimentando no sentido da seta, tem a posição de parada/partida sempre antes da linha dos tensiômetros. A parada nessa posição pode ser automática ou manual. Assim, os tensiômetros são os “sinaleiros”. O equipamento só é ligado quando o “sinal” abre, ou seja, quando a média das leituras dos tensiômetros de decisão indica o momento da irrigação.

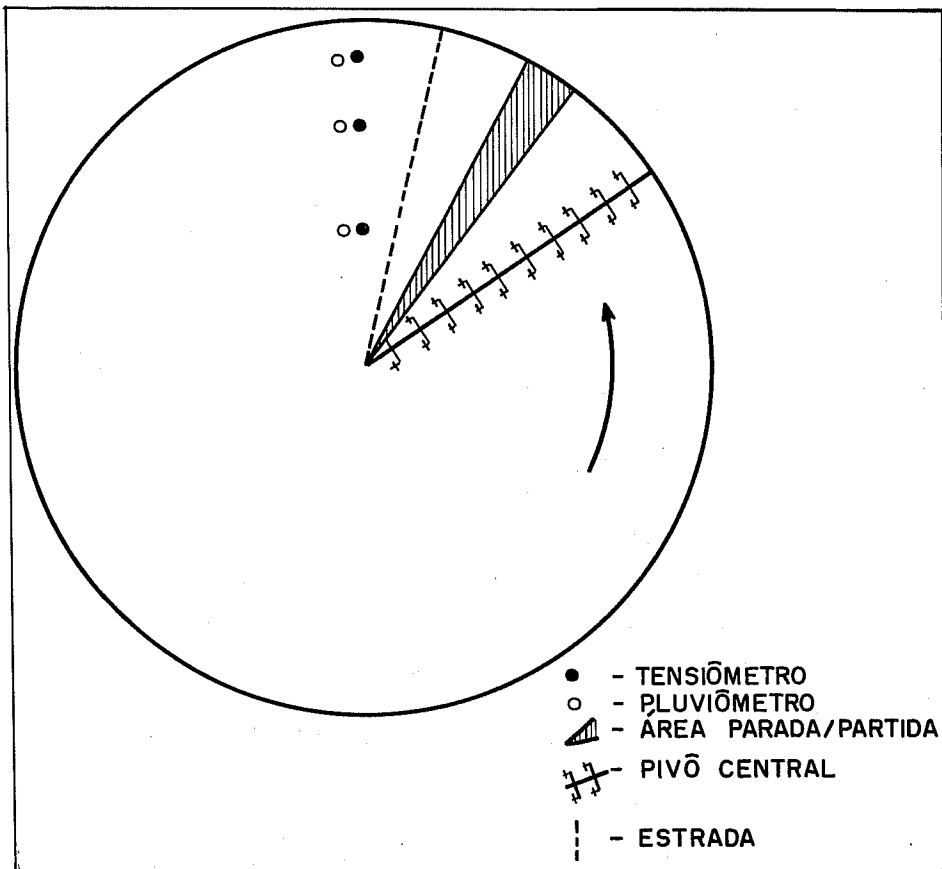


FIG. 5. Posicionamento dos tensiômetros na área irrigada.

Havendo desuniformidade de solos, os tensiômetros devem ser instalados na área mais representativa do terreno, evitando-se, para a instalação de cada bateria, pontos em pequenos acíves ou depressões, os quais favorecem a drenagem ou o acúmulo de água, respectivamente. Um detalhe muito importante é que os tensiômetros, por serem equipamentos de leituras pontuais, devem ser instalados após a verificação da curva de uniformidade de distribuição de água do pivô, que é discutida adiante. Este procedimento fará com que as baterias sejam instaladas em locais que recebem lâminas de água semelhantes, evitando-se que uma receba mais ou menos água, o que interferiria nas leituras e não representaria a condição de umidade da área como um todo. Assim, pequenos deslocamentos podem ser feitos nos locais das baterias de tensiômetros.

2.8. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Leituras podem ser feitas 24 horas após a instalação dos aparelhos no solo. O tempo de resposta, após a instalação, varia conforme o solo, a umidade atual do mesmo e o tensiômetro. Existem tensiômetros de resposta rápida.

As leituras devem ser realizadas diariamente e à mesma hora do dia, preferencialmente pela manhã. Os dados devem ser anotados em formulário apropriado (Tabela 1) e apresentados sob a forma de gráficos, cuja representação (Figura 6) dá um retrato do comportamento da tensão de água no solo durante o período, além de mostrar quando se aproxima a necessidade de irrigação.

TABELA 1. Controle das leituras dos tensiômetros.

PIVÔ CENTRAL N°		ANO						
CULTURA		MÓDULO						
DATA	PROF. DO TENSIOMETRO - cm -	LEITURA BATERIA N°			MÉDIA DAS BATERIAS - bar -	IRRIGAÇÃO LÂMINA - mm -		OBSERVAÇÃO
		1	2	3		APLIC.	ACUMUL.	
29/06	15	0,15	0,18	0,16	0,16			Início da floração
	30	0,11	0,11	0,12	0,11			
30/06	15	0,20	0,22	0,22	0,21			
	30	0,13	0,15	0,14	0,14			
01/07	15	0,28	0,26	0,25	0,26			
	30	0,13	0,15	0,14	0,14			
02/07	15	0,32	0,33	0,31	0,32	15	150	
	30	0,14	0,15	0,15	0,15			
03/07	15	0,12	0,10	0,11	0,11			
	30	0,13	0,14	0,13	0,13			
.								
.								
.								
.								
.								
.								

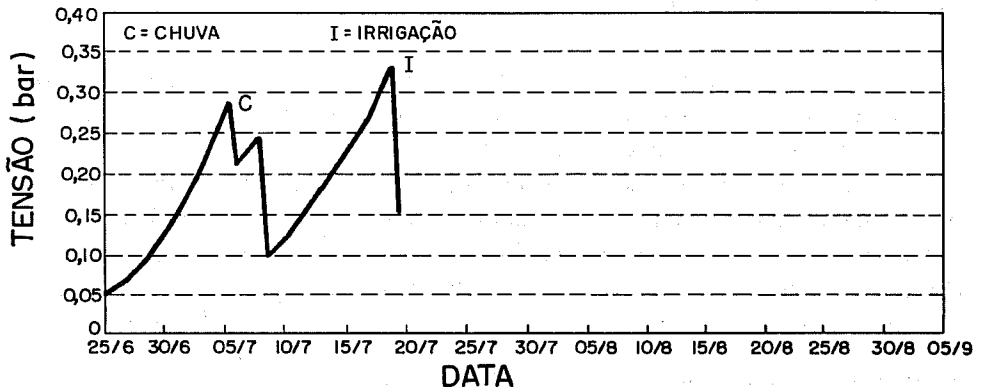


FIG. 6. Gráfico das leituras do tensiômetro instalado a 15 cm de profundidade.

É normal acumular ar na extremidade superior do tensiômetro. Como a água do solo contém ar dissolvido, toda vez que esta penetra na cápsula porosa, em resposta à irrigação ou chuva, uma pequena quantidade de ar se acumula sob a tampa. Assim, de vez em quando, deve-se tirar a tampa para eliminar o ar acumulado. Depois disso, completa-se com água e fecha-se novamente (Stone & Moreira, 1986). Para os tensiômetros de mercúrio, é necessário a utilização de uma pisseta com rolha de borracha, para a introdução de água através do tubo de náilon até a cuba de mercúrio (Figura 7), quando é retirado todo o ar do sistema.

Deve-se evitar o pisoteio ao redor das baterias, o que pode modificar a estrutura do solo, compactando-o. Ao efetuar leituras, deve ser mantida uma distância mínima de 0,5m do tensiômetro.

Os tensiômetros devem ser removidos do local antes da colheita do feijoeiro e guardados para futuras instalações. Ao removê-los, deve-se cavar, com cuidado, até a profundidade da cápsula, evitando danificá-la. É necessário que após a remoção, a cápsula seja lavada em água limpa, com o auxílio de uma escovinha.

Para guardar o tensiômetro por pouco tempo (um a dois meses), deve-se colocá-lo com a cápsula mergulhada dentro de um recipiente com água limpa. Se ele não for utilizado por um tempo maior, recomenda-se guardá-lo seco e aberto.

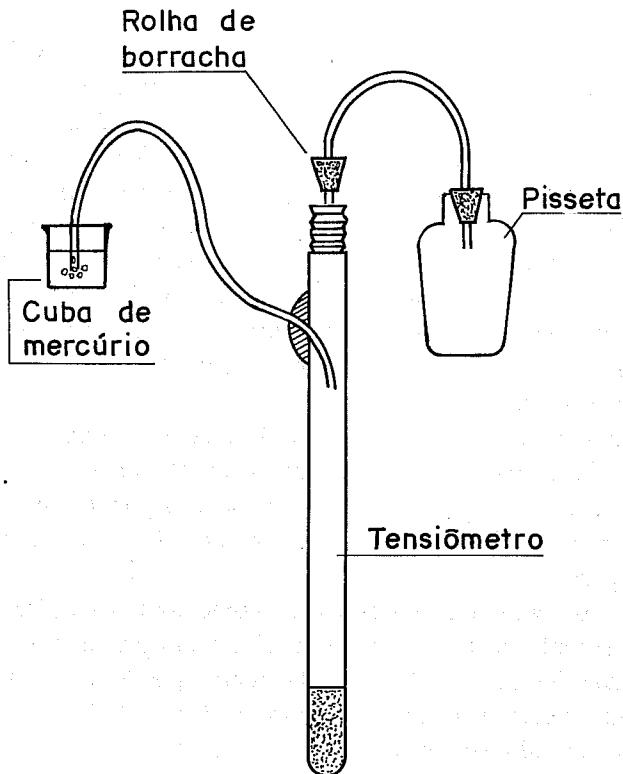


FIG. 7. Uso da pisseta para retirar o ar do tensiômetro.

2.9. VALOR DA LEITURA PARA IRRIGAÇÃO

Vários trabalhos relatam o valor máximo que a tensão da água do solo pode atingir para que não haja redução na produtividade do feijoeiro. A diferença entre os valores deve-se, principalmente, à profundidade da medição, à distância de instalação em relação a planta do feijoeiro e à demanda atmosférica. Uma boa recomendação é promover irrigação toda vez que a média das três baterias dos tensiômetros de decisão, instalados a 15 cm de profundidade, alcançar a faixa de 0,3-0,4 bar (Silveira & Stone, 1994).

Considerados os valores de tensão recomendados e o pequeno tamanho do tensiômetro, o termo 0,098h da equação (1) é desprezado e o valor da tensão é lido diretamente no vacuômetro. Em solos sob cerrados, de baixa retenção de água, ao atingir esta faixa de tensão, já foram consumidos de 50 a 60% da água disponível dos mesmos, principalmente se se considerar a “capacidade de campo” destes solos como a umidade correspondente a tensão menor que 0,1 bar. Essas irrigações, baseadas nas leituras dos tensiômetros, devem iniciar 15 a 20 dias após a emergência das plantas. Logo após a sementeira, devem-se fazer irrigações mais freqüentes, deslocando-se o pivô a maiores velocidades, para manter a camada superficial do solo sempre úmida, favorecendo a germinação e o desenvolvimento inicial das plantas e recarregando de água o perfil do solo abrangido pelo tensiômetro de decisão.

As leituras do tensiômetro de controle, localizado a 30 cm de profundidade, servem, como foi dito, para verificar se a irrigação está sendo bem feita. Leitura alta significa irrigação com déficit, e baixa com excesso, podendo ocasionar perda de água por drenagem. As leituras deste tensiômetro são mais estáveis que as do tensiômetro superior.

O que se procura e o que se considera como bom manejo da irrigação do feijoeiro, é que se tenha, no final do ciclo da cultura, um gráfico da tensão de água no solo, conforme Figura 8. Nota-se, nesta figura, que durante todo o ciclo da cultura, não houve excesso (abaixo de 0,1 bar-CC) nem déficit (acima de 0,4 bar) de água no solo acusado pelo tensiômetro de decisão.

A irrigação deve ser suspensa quando as folhas da planta de feijão vão se tornando amareladas pelo amadurecimento.

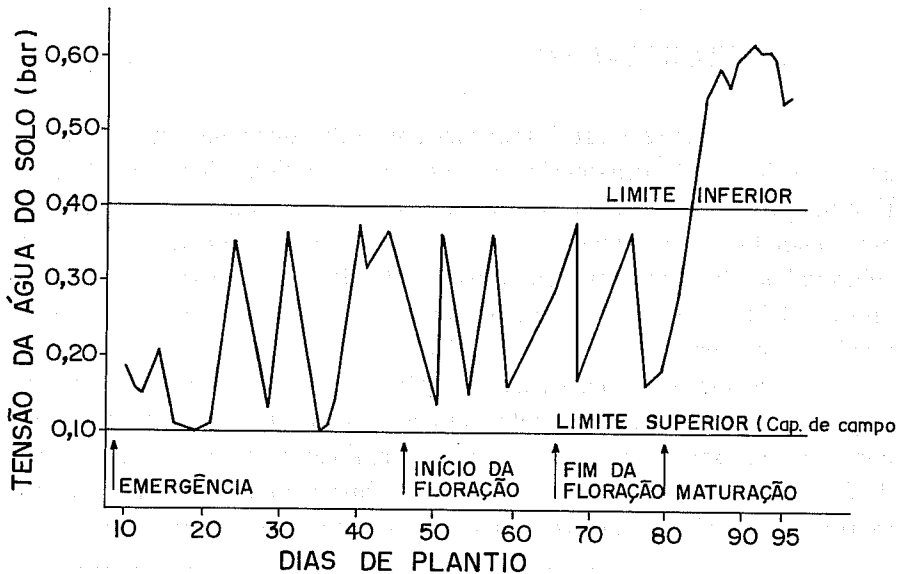


FIG. 8. Comportamento da tensão da água do solo durante o ciclo da cultura do feijoeiro.

2.10. DEFEITOS, FALHAS DE FUNCIONAMENTO E MEDIDAS DE CORREÇÃO

- Cápsula partida ou com rachaduras - trocar a cápsula.
- Rolha ressecada ou gasta, permitindo vazamento - trocar a rolha.
- Aparelho sem água, devido o solo estar seco (fora da faixa de funcionamento do tensiômetro) - irrigar e recolocar água no aparelho (repetir as operações para retirar bolhas de ar, conforme recomendado no item 2.4.).
- Vazamento na tampa, nas conexões ou no medidor - corrigir os vazamentos.
- Leituras altas após irrigação - a lâmina de água aplicada foi pequena ou a água ainda não atingiu a cápsula.
- Vacuômetro enferrujado, em virtude da penetração de água no seu interior, ou apresentando deferimento do ponteiro - trocar a borracha de vedação do vidro do vacuômetro, regular o ponteiro ou trocar o vacuômetro.
- Tensiômetro solto no solo, com pouco contato - reinstalar tensiômetro.
- Cápsula suja, com deposição de material na sua superfície - lavar a cápsula com água, usando uma escovinha e enxaguá-la em água limpa.

3. CURVA DE RETENÇÃO (Quanto Irrigar)

3.1. CARACTERIZAÇÃO

A curva de retenção é uma curva que relaciona o teor ou o conteúdo de água no solo com a força (tensão) com que ela está retida pelo mesmo (Figura 9). É uma propriedade físico-hídrica do solo, determinada em laboratório, preferencialmente com amostras indeformadas, coletadas em anéis apropriados, submetidos a diferentes tensões, com o auxílio de placas porosas, em câmaras de pressão. Obtém-se a curva relacionando o teor de água do solo para diversas tensões, por exemplo: 0,1, 0,3, 0,6, 1,0, 3,0 e 15 bar.

A avaliação da curva de retenção permite uma estimativa rápida da disponibilidade de água no solo para as plantas, na profundidade de solo considerada. Assim, pode-se determinar a quantidade máxima de armazenamento de água (capacidade de campo = CC), o armazenamento mínimo (ponto de murchamento = PM) ou o armazenamento em qualquer ponto da curva.

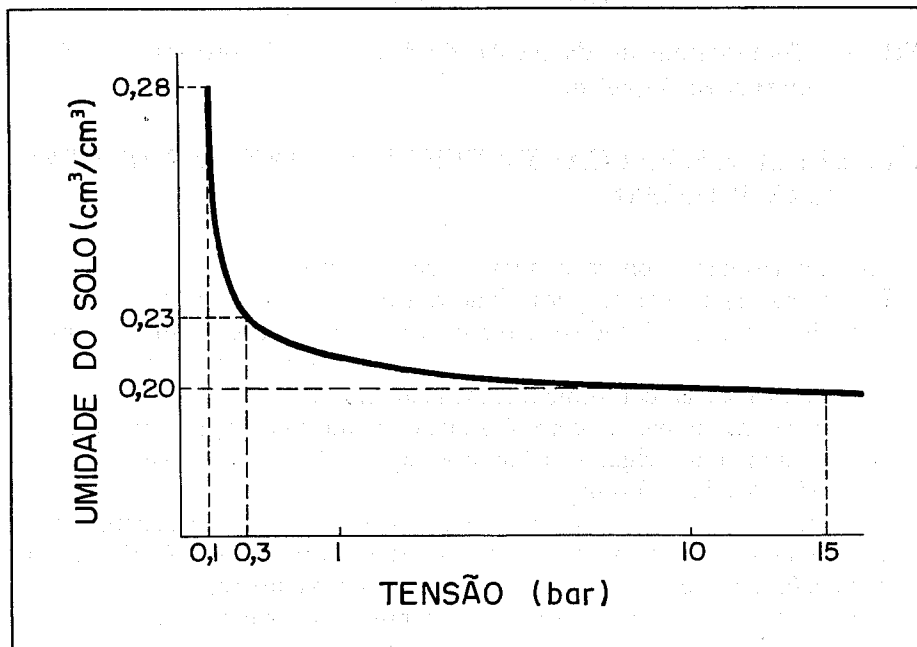


FIG. 9. Curva de retenção de água no solo.

3.2. CÁLCULO DA LÂMINA DE IRRIGAÇÃO

A quantidade de água de irrigação (LL), utilizando-se a curva de retenção, é o resultado da diferença entre a quantidade máxima de água (CC) e a quantidade de água existente na tensão para reinício da irrigação (MI), multiplicado pela espessura da camada de solo considerada (PC). Assim:

$$LL = (CC - MI) \times PC \dots\dots\dots (3)$$

Na realidade, este resultado nada mais é que o déficit de água existente no solo no momento de reiniciar a irrigação. Na Figura 9, a quantidade máxima de água no solo (CC), correspondente à tensão de 0,1 bar, é igual a 0,28 cm³/cm³. A quantidade de água no momento da irrigação (MI), considerada, no caso, igual a 0,3 bar (item 2.9), é igual a 0,23 cm³/cm³. Utilizando-se da Figura 9, para exemplificar o cálculo da lâmina líquida de irrigação (LL) para uma camada de solo de 0-30 cm de profundidade (PC), tem-se:

$$LL = (0,28 - 0,23) \times 30 \text{ cm} = 1,5 \text{ cm} = 15 \text{ mm.}$$

Logo, toda vez que a média dos tensiômetros de decisão, instalados como na Figura 5, atingir 0,3 bar, a lâmina líquida de água de irrigação (LL) será de 15 mm.

A lâmina bruta de irrigação (LB) será dada pela equação:

$$LB = \frac{LL}{EA} \dots\dots\dots (4)$$

onde: EA = eficiência de aplicação de água do pivô central, a ser discutida adiante.

Se a EA do equipamento de irrigação, por exemplo, for igual a 0,83, a lâmina bruta de irrigação será:

$$LB = \frac{15}{0,83} = 18 \text{ mm}$$

Verificando a tabela de lâmina de água de irrigação, aplicada conforme a velocidade de deslocamento do pivô, estimada pela regulagem do percentímetro, o agricultor irrigante seleciona a regulagem que fornece a lâmina de 18 mm de água.

O mesmo cálculo pode ser feito se se considerar o momento de irrigação (MI) igual a 0,4 bar ou a outro valor qualquer. Observa-se que, por este método, o agricultor fica conhecendo a quantidade de água de irrigação antes mesmo de fazer o plantio do feijão, e este é o único cálculo necessário.

3.3. COLETA DO SOLO PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO

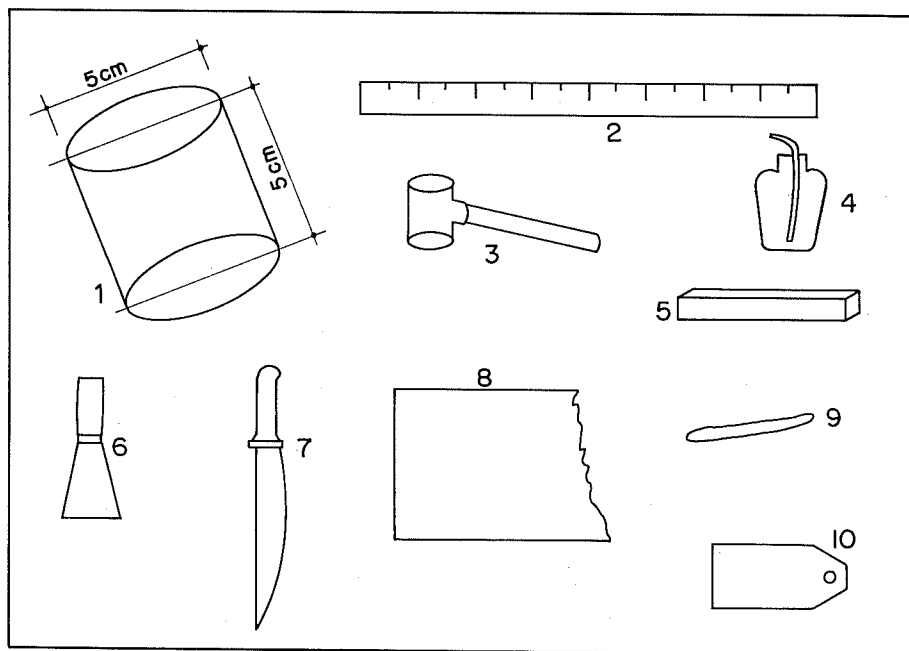
As amostras do solo, de estrutura indeformada, serão representativas de uma camada de solo de 0-30 cm de profundidade. Assim, serão coletadas amostras nas camadas de 0-15 cm e 15-30 cm e usada a média dos valores obtidos para representar a retenção de água da camada de 0-30 cm. Abre-se uma trincheira de 0,8 x 0,8 x 0,8 m. O operador, uma vez dentro da trincheira, terá a sua frente um perfil do solo para início da coleta das amostras.

Na retirada das amostras usam-se anéis de aço, de bordas cortantes e dimensões em torno de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura (Figura 10). Estes anéis podem ser construídos pelo irrigante, nas dimensões mencionadas, empregando tubo de aço, de parede fina, adquiridos no comércio. Crava-se o anel no solo, por pancadas ou por pressão, removendo-o, a seguir, com o excesso de terra, que será eliminado com o auxílio de uma faca cortante até igualar com ambas as bocas do anel. O anel é tampado nas duas extremidades com plástico e ligas de borracha. Para facilitar a penetração do anel, convém umedecer o solo com pequena quantidade de água de uma pisseta, tornando-o friável sem encharcá-lo. Apóia-se uma peça de madeira sobre o anel, a qual tem por função receber as pancadas de martelo e direcionar a penetração do anel (Figura 11).

Na camada de 0-15 cm, o anel se posicionará a 5 cm de profundidade, de modo que, na instalação, a camada de solo de 0-5 cm de profundidade é eliminada.

Após amostrada a primeira camada, elimina-se o solo superior a 20 cm de profundidade e retira-se a amostra da camada de 15-30 cm. Em cada profundidade são retiradas duas amostras, em três pontos representativos da área do pivô.

As amostras são numeradas, acondicionadas em caixa de papelão e levadas ao laboratório apropriado.



- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1 - Anel de aço | 6 - Espátula média |
| 2 - Régua | 7 - Faca |
| 3 - Marreta | 8 - Pedaco de plástico |
| 4 - Pisseta | 9 - Liga de borracha |
| 5 - Pedaco de madeira | 10 - Etiqueta |

FIG. 10. Materiais necessários na coleta de amostra de solo no campo, para determinação da curva de retenção de água.

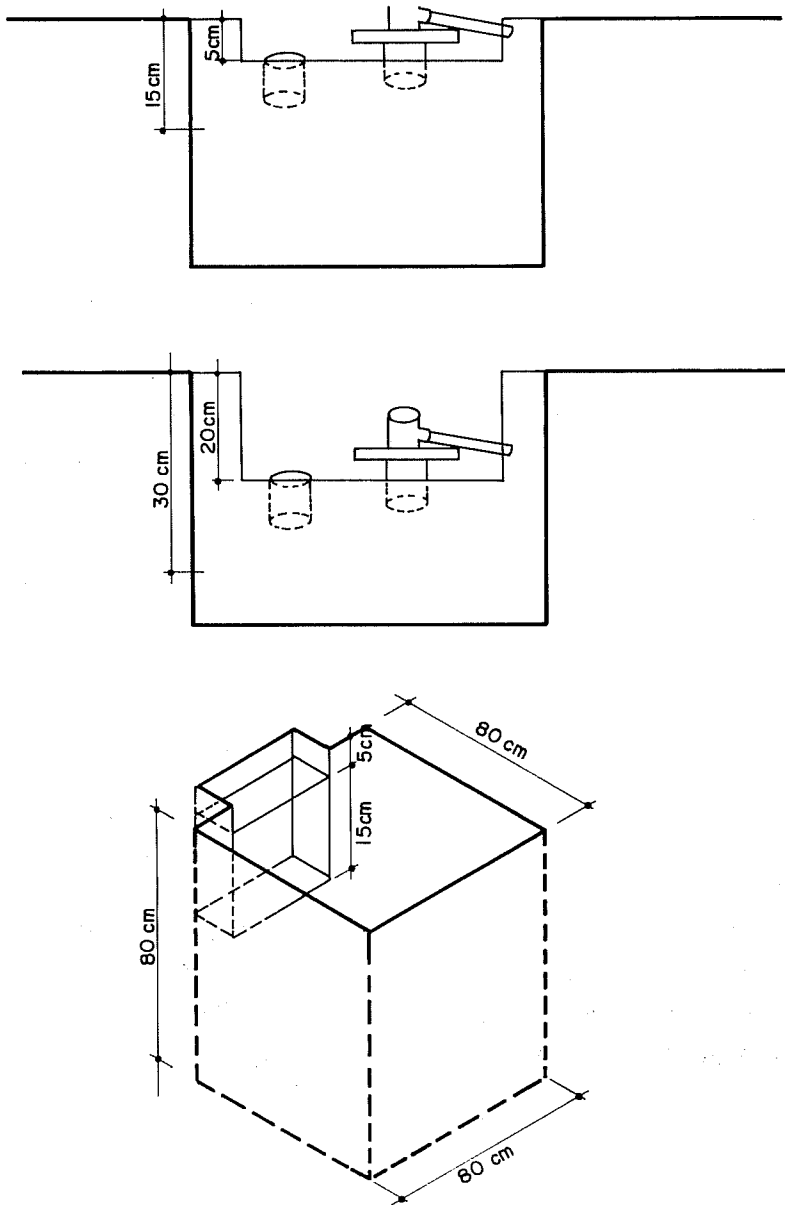


FIG. 11. Retirada do solo no campo para determinação da curva de retenção de água.

4. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PIVÔ CENTRAL

É de grande importância o conhecimento do desempenho de qualquer sistema de irrigação. Não se deve nunca esquecer que a irrigação é um “meio” e não um “fim”, e que o principal objetivo de qualquer projeto de irrigação é aumentar a produtividade e diminuir o custo por unidade produzida.

Muito dos projetos de irrigação são mal adaptados às condições de solo e/ou topografia do local onde estão instalados, porque, geralmente, seleciona-se e dimensiona-se um equipamento de irrigação sem se ter conhecimento das características de infiltração e de retenção da água do solo onde será implantado o projeto. A não determinação de certos dados, poucos e fáceis de serem obtidos antes do projeto, é, na maioria das vezes, a causa de sérios prejuízos, muitos deles irreversíveis.

Quando se avalia um sistema de irrigação em funcionamento, não se deve restringir somente à determinação de sua eficiência atual, mas sim caracterizar os principais problemas e sugerir alterações no manejo e, algumas vezes, no próprio dimensionamento, de modo que o sistema possa funcionar com melhor eficiência. Para a quantificação e qualificação da situação atual e o fornecimento de alternativas, quando necessárias para melhorar a eficiência do sistema, é preciso determinar as condições de funcionamento e manejo do equipamento e decidir se elas são ou não aceitáveis. Isso requer medições das condições atuais e determinação das condições potenciais para máxima eficiência.

Em geral, a baixa eficiência nos projetos de irrigação por aspersão está relacionada com a desuniformidade de aplicação de água e com a perda de água por evaporação e por arrastamento pelo vento. Desta maneira, o planejamento racional de um sistema de irrigação por aspersão requer, além do conhecimento de parâmetros climáticos, de solos e de recursos naturais, o conhecimento da distribuição e da quantidade de água aplicada, bem como da intensidade e da eficiência de aplicação.

Os principais parâmetros usados para determinar a eficiência de irrigação por aspersão são a uniformidade de aplicação e a eficiência de aplicação.

4.1. DETERMINAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA

Para se determinar a uniformidade de aplicação de água em sistema de irrigação por pivô central, recipientes coletores devem ser colocados em quatro raios do círculo irrigado (Figura 12), de acordo com a metodologia proposta por

Merriam & Keller (1979). Dois raios devem ser tomados no sentido da maior declividade do terreno e os outros dois, em nível. Dependendo da disponibilidade de tempo para realizar o teste, pode-se considerar apenas três raios, sendo dois no sentido da maior declividade, ou ainda, considerar somente dois, um no sentido da maior declividade e outro em nível.

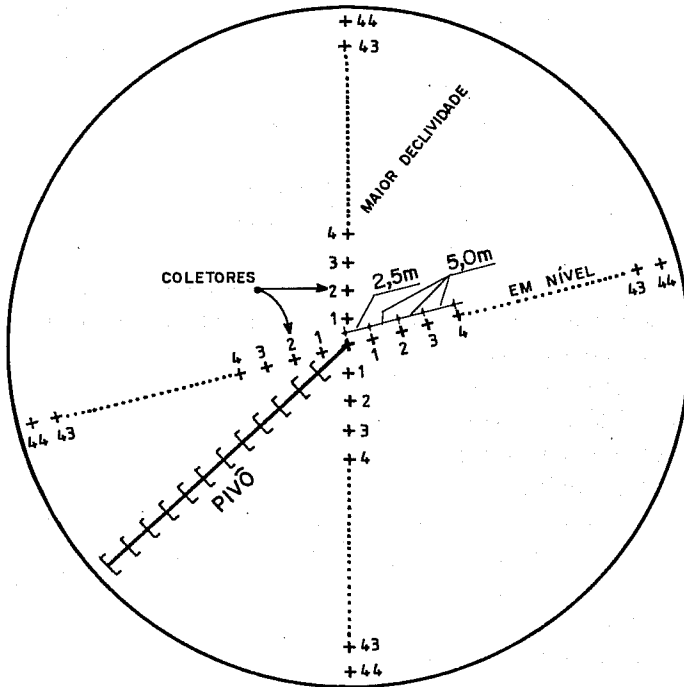


FIG. 12. Disposição dos coletores no campo.

Os coletores (Figura 13) devem ser numerados, em ordem crescente, a partir do centro do pivô, e igualmente afastados entre si de 3 a 10 m, tomando-se a precaução de evitar o caminho percorrido pelas rodas.

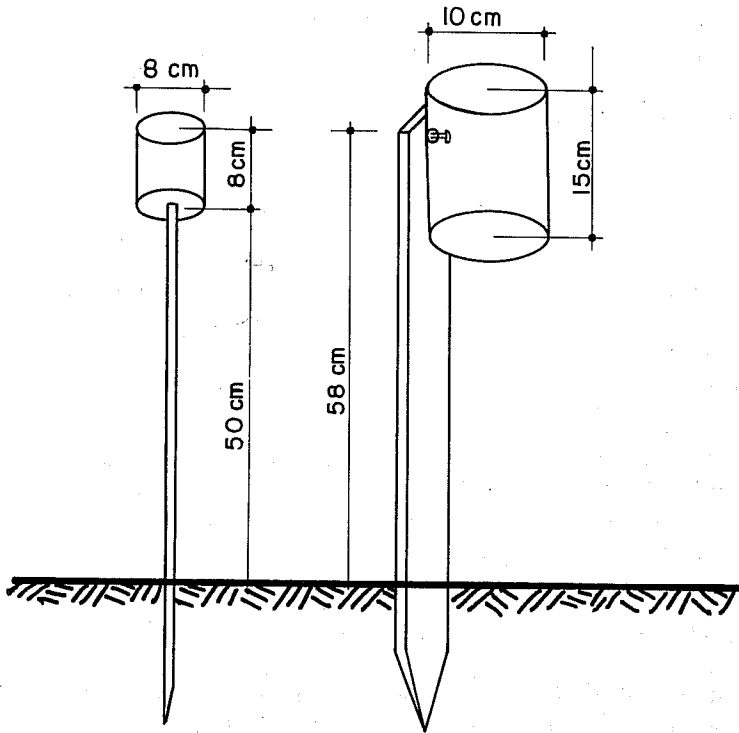


FIG. 13. Coletores de água (pluviômetros).

A equação que define a posição do coletor, em função do espaçamento, é dada por:

$$d_i = (i - 0,5) e \dots \dots \dots (5)$$

onde: d_i = distância do centro de rotação do pivô até o local de instalação do coletor, em m; i = número de ordem do coletor; e = espaçamento entre os coletores, em m.

Deste modo, se o espaçamento entre os coletores for de 5 m, o primeiro será colocado a 2,5 m do centro do pivô, o segundo a 7,5 m, o terceiro a 12,5 m e, assim, por diante.

Cada coletor representa uma fração da área sob o pivô central, cujo valor pode ser expresso por:

$$f_i = 2\pi d_i e \dots\dots\dots (6)$$

onde: f_i = área representativa do i ésimo coletor, isto é, a área compreendida pelo círculo de raio $d_i + e/2$ e o círculo de raio $d_i - e/2$, em m^2 ; d_i = distância do centro de rotação do pivô até o local de instalação do coletor, em m; e = espaçamento entre os coletores, em m.

Como cada coletor representa uma área maior, à medida que se afasta do centro do pivô, deve-se ponderar os valores coletados. A ponderação é feita considerando como peso as frações de área f_i . Substituindo a equação (5) na equação (6) obtém-se f_i em função de i , isto é:

$$f_i = 2\pi e^2 (i - 0,5) \dots\dots\dots (7)$$

Uma vez fixado o espaçamento entre os coletores (e), o termo $2\pi e^2$ é constante; portanto, na ponderação, considera-se $(i - 0,5)$.

Os volumes de água, coletados após a passagem do pivô pelo local de teste, devem ser medidos com a maior rapidez possível para minimizar as perdas por evaporação. Eles são medidos com uma proveta graduada e, posteriormente, convertidos em altura de água (lâmina), pela consideração da área da boca do coletor.

Existe no comércio um conjunto de coletores acompanhado por provetas de leitura direta da lâmina de água coletada. Deve-se medir as perdas por evaporação durante o teste. Para isto, utilizam-se dois coletores, colocados próximos à área de teste, com uma quantidade de água medida antecipadamente e, por medição posterior no final do teste, determina-se a taxa de evaporação. Caso o teste seja demorado e a demanda evaporativa da atmosfera seja elevada, o volume evaporado deve ser acrescido às leituras dos coletores, proporcionalmente ao tempo despendido para fazê-las. Deve-se determinar ainda o tempo necessário para uma revolução, a área irrigada, a vazão e pressão no sistema e a demanda evaporativa no momento do teste (velocidade do vento, temperatura do ar e umidade relativa).

De acordo com dados de Merrian et al. (1973), confirmados por testes feitos por Bridi (1984) e Cotrim et al. (1988), os valores da uniformidade de distribuição independem da velocidade de operação. Neste caso, sugere-se fazer o teste na velocidade máxima de operação e a 50% desta velocidade.

A precipitação média ponderada (\bar{X}), em milímetro, é igual a:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i X_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \dots\dots\dots (8)$$

onde: X_i = precipitação observada no coletor de ordem i , em mm; $N_i = i - 0,5$; i = número de ordem do coletor; n = número de coletores.

É apresentado na Tabela 2 o exemplo de um teste de campo para determinação da uniformidade de aplicação, com as precipitações coletadas e os cálculos necessários para determinação da precipitação média ponderada. Considerando que os somatórios de $N_i X_i$ e de N_i são iguais a 938,405 e 200, respectivamente, a precipitação ponderada é igual a $938,405/200 = 4,692\text{mm}$.

Após o cálculo da precipitação média ponderada, pode-se utilizar uma das várias equações que existem para calcular a uniformidade de aplicação de um sistema de irrigação por aspersão. A equação de Christiansen, proposta em 1942, e a equação de uniformidade de distribuição, proposta em 1956 por Criddle e outros e recomendada pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos, estão entre as mais usadas.

Para pivô central, segundo Heermann & Hein (1968), o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), em porcentagem, é calculado por:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n N_i |X_i - \bar{X}|}{\sum_{i=1}^n N_i X_i} \right) \dots\dots\dots (9)$$

onde: X_i = precipitação observada no coletor de ordem i , em mm; \bar{X} = precipitação média ponderada, em mm; $N_i = i - 0,5$; i = número de ordem do coletor; n = número de coletores.

TABELA 2. Exemplo de um teste de campo aplicado a um pivô central de 3 ha de área irrigada, operando na velocidade máxima, com os coletores espaçados de 5m, apresentando as precipitações coletadas e os cálculos necessários à determinação da precipitação média ponderada.

Nº DE ORDEM DO COLETOR (i)	i-0,5 (Ni)	PRECIPITAÇÃO OBSERVADA NO COLETOR, EM mm (Xi)	NiXi
1	0,5	3,00	1,500
2	1,5	3,95	5,925
3	2,5	3,88	9,700
4	3,5	4,33	15,115
5	4,5	4,26	19,170
6	5,5	6,87	37,785
7	6,5	5,70	37,050
8	7,5	4,52	33,900
9	8,5	5,92	50,320
10	9,5	4,65	44,175
11	10,5	4,90	51,450
12	11,5	4,77	54,855
13	12,5	5,33	69,125
14	13,5	4,26	57,510
15	14,5	5,79	83,955
16	15,5	4,77	73,935
17	16,5	4,00	66,000
18	17,5	3,89	68,075
19	18,5	4,20	77,700
20	19,5	4,16	81,120
SOMA	200	-	938,405

Como exemplo, considerando as precipitações coletadas apresentadas na Tabela 2 e a precipitação média ponderada igual a 4,692 mm. construiu-se a Tabela 3. Sendo o somatório de $N_i | X_i - \bar{X} |$ igual a 119,305 e o de $N_i X_i$ igual a 938,405 (Tabela 2), tem-se:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{119,305}{938,405} \right) = 87,3\%$$

O coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), em porcentagem, é calculado por:

$$CUD = 100 \left(\frac{\sum_{i=p}^q N_i X_i}{\bar{X} \sum_{i=p}^q N_i} \right) \dots\dots\dots (10)$$

onde: X_i = precipitação observada no coletor de ordem i , em mm; \bar{X} = precipitação média ponderada, em mm; $N_i = i-0,5$; i = número de ordem do coletor; p = primeiro elemento da série crescente de lâminas coletadas; q = elemento $n/4$ da série crescente de lâminas coletadas; n = número de coletores.

Considerando, no exemplo da Tabela 2, as cinco menores precipitações coletadas (20/4), em ordem crescente, construiu-se a Tabela 4. Sendo os somatórios de $N_i X_i$ e de N_i iguais, respectivamente, a 151,2 e 38,5, tem-se:

$$CUD = 100 \left(1 - \frac{151,2}{4,692 \times 38,5} \right) = 83,7\%$$

De acordo com Merrian et al. (1973), para culturas de alto rendimento econômico, com sistema radicular raso, o CUC deve estar acima de 88% ou CUD acima de 80%. O feijoeiro irrigado se enquadra nesta categoria.

TABELA 3. Exemplo de planilha de cálculo para determinação do coeficiente de uniformidade de Christiansen, para pivô central.

Nº DE ORDEM DO COLETOR (i)	i - 0,5 (Ni)	PRECIPITAÇÃO OBSERVADA NO COLETOR, EM mm (Xi)	$ X_i - \bar{X} $ *	$N_i X_i - \bar{X} $
1	0,5	3,00	1,692	0,846
2	1,5	3,95	0,742	1,113
3	2,5	3,88	0,812	2,030
4	3,5	4,33	0,362	1,267
5	4,5	4,26	0,432	1,944
6	5,5	6,87	2,178	11,979
7	6,5	5,70	1,008	6,552
8	7,5	4,52	0,172	1,290
9	8,5	5,92	1,228	10,438
10	9,5	4,65	0,042	0,399
11	10,5	4,90	0,208	2,184
12	11,5	4,77	0,078	0,897
13	12,5	5,53	0,838	10,475
14	13,5	4,26	0,432	5,832
15	14,5	5,79	1,098	15,921
16	15,5	4,77	0,078	1,209
17	16,5	4,00	0,692	11,418
18	17,5	3,89	0,802	14,035
19	18,5	4,20	0,492	9,102
20	19,5	4,16	0,532	10,374
SOMA	-	-	-	119,305

* $\bar{X} = 4,692$ mm.

TABELA 4. Exemplo de planilha de cálculo para determinação do coeficiente de uniformidade de distribuição, para pivô central.

Nº DE ORDEM DO COLETOR (i)	i - 0,5 (Ni)	PRECIPITAÇÃO OBSERVADA NO COLETOR, EM mm (Xi)	NiXi
1	0,5	3,00	1,500
3	2,5	3,88	9,700
18	17,5	3,89	68,075
2	1,5	3,95	5,925
17	16,5	4,00	66,000
SOMA	38,5		151,200

É importante que sejam traçados gráficos da precipitação coletada em milímetro, em relação à distância de cada coletor ao centro do pivô, com o objetivo de visualizar melhor a variação da lâmina de água em torno da média, ao longo da linha lateral. Isto é importante na seleção dos pontos de instalação de tensiômetros. Eles devem ser instalados em pontos mais representativos da precipitação média e não em pontos de precipitação máxima ou mínima. Outra utilização deste perfil é a identificação de aspersores ou difusores com problemas, bem como a observação da tendência predominante na distribuição de água ao longo da tubulação. Nas Figuras 14 e 15 são apresentados dois perfis de distribuição de água. Verifica-se que na Figura 14 as precipitações variam menos ao redor da média do que no perfil apresentado na Figura 15. Em um pivô central, com este último perfil de distribuição de água, a aplicação de adubos ou defensivos via água de irrigação seria problemática devido a desuniformidade na distribuição da água.

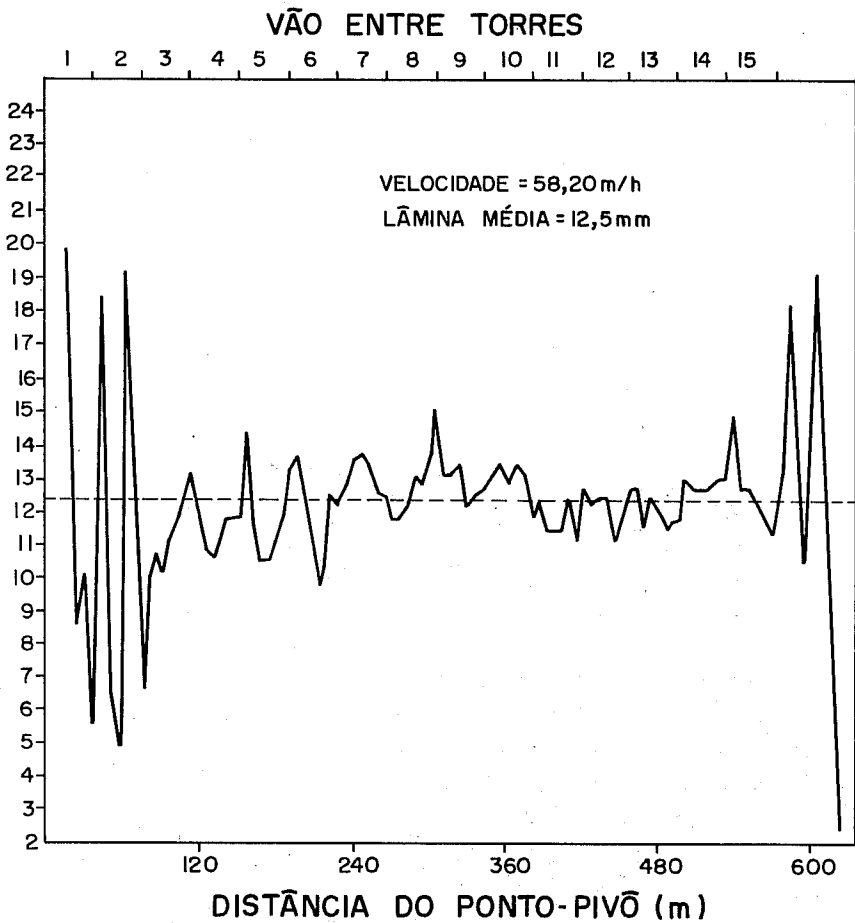


FIG. 14. Perfil da precipitação ao longo da linha lateral, para sistema operando com 40% da velocidade máxima, com CUC = 89,8% e CUD = 72,2% (adaptado de Bridi, 1984).

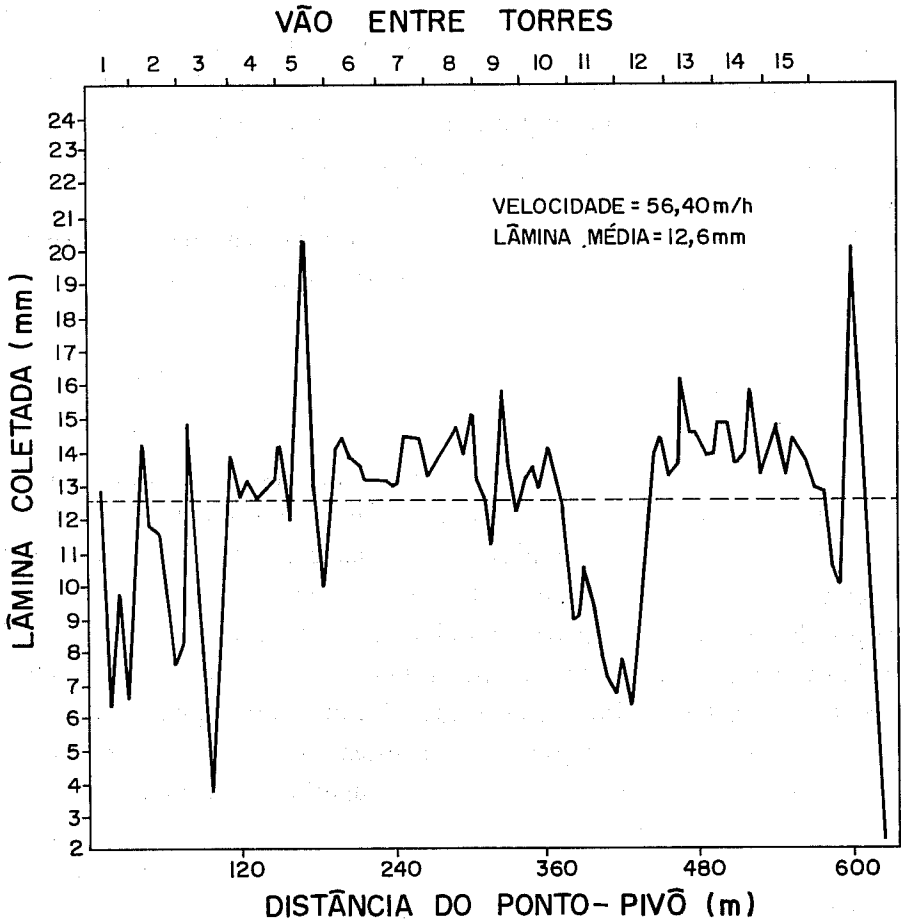


FIG. 15. Perfil da precipitação ao longo da linha lateral, para sistema operando com 40% da velocidade máxima, com CUC = 82,5% e CUD = 71,4% (adaptado de Bridi, 1984).

A uniformidade de aplicação de água em pivôs centrais é afetada pelo diâmetro dos bocais, espaçamento e pressão de operação dos aspersores e pela ação do vento. Quando os valores do CUC ou CUD estão abaixo do mínimo recomendado, deve-se verificar se a ordem de colocação dos aspersores ou difusores não está alterada, se há entupimento nos bocais, se há falha no funcionamento dos reguladores de pressão e se a pressão no último aspersor está correta. Identificado algum problema, deve-se saná-lo imediatamente, seja pelo conserto ou substituição de aspersores ou difusores com defeito, seja pela adequação da pressão necessária. Se o problema for a ação do vento, pode-se minimizá-la adotando-se tubos de descida no pivô (bengalas), reduzindo a distância do aspersor ao solo e pelo uso de quebra-ventos adequados.

4.2. DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DE ÁGUA

A eficiência de aplicação de água é definida pela relação entre a quantidade de água incorporada ao solo, até a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, e a quantidade de água aplicada. As perdas que podem ocorrer na aplicação de água através de aspersores são resultantes da evaporação observada desde a saída do jato dos bocais até a superfície do solo, da percolação abaixo da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura e do escoamento superficial para fora da área efetivamente sob cultivo (Scaloppi, 1984).

Um dimensionamento adequado de sistema de irrigação por aspersão não deve permitir perdas de água por escoamento superficial. Assim, a eficiência de aplicação de água (EA) é função apenas das perdas por evaporação e deriva causada pelo vento, e das perdas por percolação profunda, dependentes da uniformidade de distribuição de água e da proporção da quantidade de água requerida relativamente à quantidade média de água aplicada.

Keller (1979) considera que as perdas causadas pela deriva ao vento e evaporação assumem valores típicos variáveis entre 5 e 10%, e apresenta um gráfico (Figura 16) que permite estimar a razão efetiva da água aplicada que atinge a superfície vegetada, em diferentes condições evaporativas e em dois graus de pulverização do jato de água.

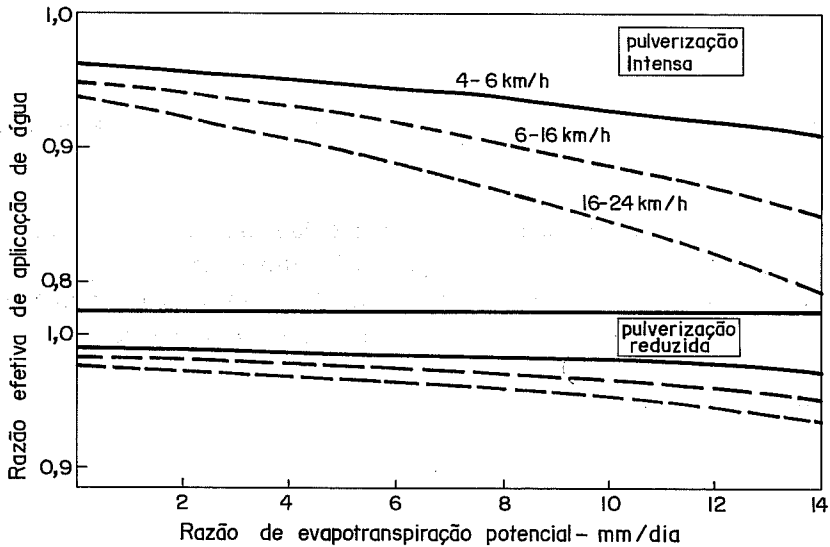


FIG. 16. Razão efetiva de aplicação de água estimada em função da razão de evapotranspiração potencial, em duas condições de pulverização do jato e três condições de velocidade média do vento durante o período de operação (adaptado de Keller, 1979).

As perdas de água por evaporação e por arrastamento pelo vento (PEAV), no trajeto das gotas de água, podem ser determinadas, em milímetro, comparando-se a lâmina média aplicada (Hm) com a precipitação média ponderada (\bar{X}). Assim:

$$PEAV = Hm - \bar{X} \dots \dots \dots (11)$$

ou, em porcentagem, tem-se:

$$PEAV = 100 \left(1 - \frac{\bar{X}}{Hm} \right) \dots \dots \dots (12)$$

A lâmina média aplicada, em milímetro, pode ser determinada pela equação:

$$Hm = \frac{Q.T}{10.A} \dots\dots\dots (13)$$

onde: Q = vazão do pivô central, em m³/h; T = tempo gasto por rotação, em h;
A = área total irrigada, em ha.

O tempo gasto por rotação pode ser calculado da seguinte forma:

- . fincar uma estaca em frente a um dos pneus da última torre;
- . ligar o pivô na velocidade utilizada no teste, mediante ajuste do relé percentual, e, após 30 minutos, fincar outra estaca em frente ao mesmo pneu;
- . medir a distância (d), em m, entre as duas estacas;
- . calcular T, em h, mediante a equação:

$$T = \frac{\pi R}{d} \dots\dots\dots (14)$$

onde: R = raio até a última torre, em m.

Caso o teste tenha sido feito para mais de uma velocidade, deve-se repetir o procedimento para as outras velocidades. Como exemplo, considerando-se que a distância (d) medida após 30 minutos foi igual a 62,5 m e o raio até a última torre é igual a 254 m, o tempo gasto por rotação (T) será igual a:

$$T = \frac{\pi \cdot 254}{62,5} = 12,8h$$

A determinação da vazão é o aspecto mais crítico, pois requer equipamento específico. Para medição de vazão em tubulações podem ser utilizados hidrômetros e medidores diferenciais, entre outros. Em estudo conduzido em Minas Gerais, vazões de pivôs centrais foram determinadas utilizando-se um medidor de vazão por ultra-som e efeito dopler (CEMIG, 1993).

As perdas por evaporação são maiores quanto menor for a lâmina aplicada, ou seja, quanto maior for a velocidade de operação do pivô (Figura 17). Em alta velocidade de operação, a água aspergida é colocada continuamente em contato com novas camadas de ar seco, o que favorece a evaporação direta.

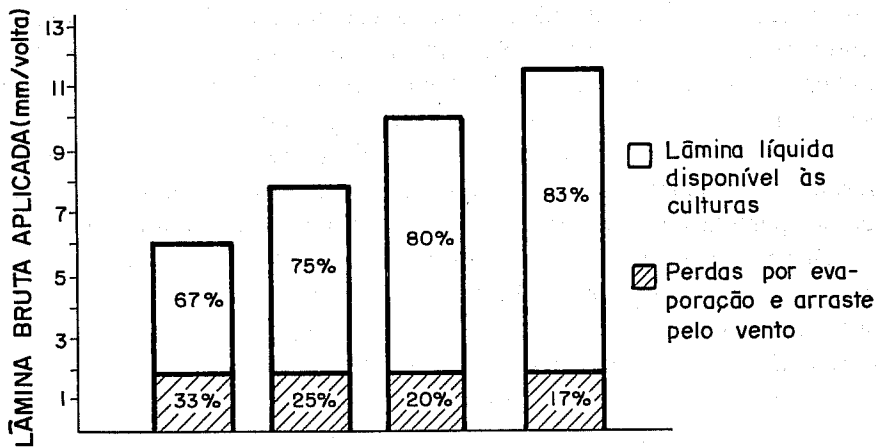


FIG. 17. Perdas de água por evaporação e arraste pelo vento, em função da lâmina bruta aplicada (adaptado de Treuenfels & Mendes, 1985).

Como as perdas por evaporação e deriva ao vento variam com a lâmina de água aplicada, com a velocidade do vento e com a demanda evaporativa da atmosfera, e como as perdas por percolação profunda são difíceis de serem avaliadas em sistemas de irrigação por aspersão, além de, para uma determinada uniformidade de distribuição de água, dependerem da relação entre lâmina requerida pela cultura e lâmina infiltrada, fica difícil determinar-se a EA que deve ser usada no cálculo da lâmina bruta a ser aplicada. Seria necessário considerar, em cada irrigação, um valor de EA, dependendo da lâmina a ser aplicada e das condições climática vigentes.

Dessa maneira, considera-se que culturas de elevado valor econômico, como o feijoeiro, desenvolvidas em condições de irrigação tipicamente obrigatória, requerem uma aplicação de água de forma que restrinja ao máximo a proporção da área total que recebe uma lâmina de água inferior à requerida. Para atender esse objetivo, a EA não pode atingir valores muito elevados, para que ocorram significativos acréscimos na lâmina a ser aplicada e, em conseqüência, apenas uma pequena proporção da área total será deficientemente irrigada. Benami (1982) considera que a lâmina requerida deve ser igual à lâmina mínima infiltrada, o que assegura uma lâmina aplicada igual ou superior à requerida em toda a área, proporcionando uma eficiência de armazenamento de água igual a 100%.

A eficiência de armazenamento é definida pela relação entre a quantidade de água incorporada ao solo até a profundidade radicular efetiva da cultura e a quantidade de água requerida. Segundo Scaloppi (1984), essa alternativa, entretanto, somente poderá ser justificada em culturas de elevado valor econômico, desenvolvidas em condições tais que toda a água utilizada para a produção provém da irrigação. Nessas condições, admite-se que o valor econômico do acréscimo de produção obtido seja superior aos custos associados às perdas de água por percolação profunda na área irrigada, uma vez que todo sistema de irrigação apresenta um certo grau de desuniformidade de aplicação, que contribui para aumentar o custo das irrigações. Muitas vezes, a aplicação excessiva de água tem a finalidade de promover a lixiviação dos sais solúveis da zona radicular e, por isso, não constitui efetivamente uma perda.

Como o CUD é um índice relativamente rigoroso de uniformidade, Keller (1979) recomenda utilizar o seu valor como estimativa da EA, para o cálculo da quantidade de água a ser aplicada em culturas de elevado valor econômico.

No exemplo da Figura 18, a lâmina média de água infiltrada (considerada igual a coletada) em um pivô central, operando a 50% da velocidade máxima, foi igual a 6,5 mm. Esse pivô apresentava uma uniformidade de distribuição de água que proporcionou os valores de 82,5% para CUC e 70% para CUD. Considerando a lâmina requerida pela cultura igual a infiltrada, 6,5 mm, observa-se uma certa porcentagem da área com irrigação deficiente. Aplicando o critério de Keller (1979), a lâmina média infiltrada deveria ser igual a $6,5 \text{ mm} / 0,7 = 9,3 \text{ mm}$, o que reduziria em muito a porcentagem da área deficientemente irrigada (Figura 19), apesar de aumentar as perdas por percolação. Para esta condição, considerando a razão efetiva de aplicação de água igual a 95%, ou seja, perdas por evaporação e deriva ao vento iguais a 5%, a EA seria igual a $0,7 \times 0,95 = 0,665$ e a lâmina bruta a ser aplicada igual a $6,5 \text{ mm} / 0,665 = 9,8 \text{ mm}$.

As perdas por percolação e a porcentagem da área deficientemente irrigada são tanto menores quanto maior for o valor de CUD, ou seja, quanto mais uniforme for a distribuição da água na área irrigada.

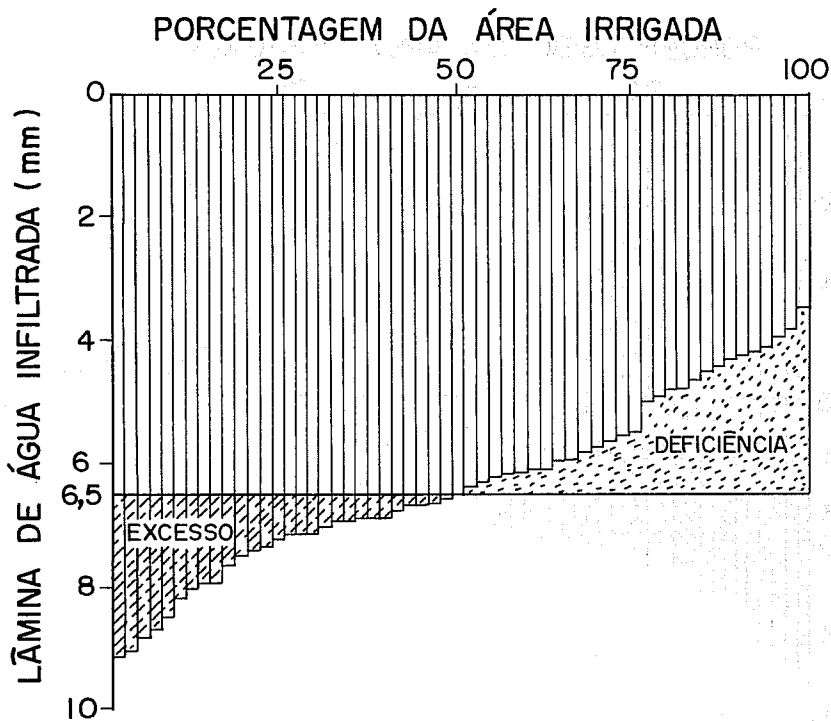


FIG. 18. Modelo de distribuição de água de um pivô central operando a 50% da velocidade máxima, com CUC = 82,5% e CUD = 70%, mostrando a porcentagem da área com excesso e a com deficiência de água, para uma lâmina de água requerida igual a lâmina média infiltrada.

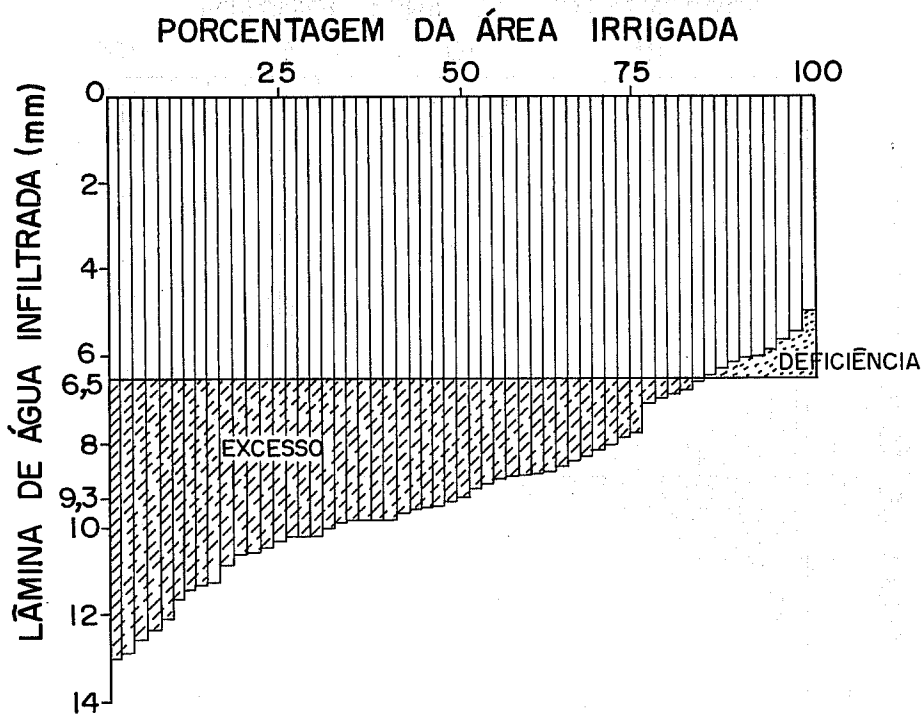


FIG. 19. Modelo de distribuição de água de um pivô central operando a 50% da velocidade máxima, com CUC = 82,5% e CUD = 70%, mostrando a porcentagem da área com excesso e a com deficiência de água, para uma lâmina de água requerida igual a 70% da lâmina média infiltrada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, J.A. de; FREIRE, J.C.; SILVA, E.M. da. Características físico-hídricas importantes para a irrigação de solos representativos de cerrados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 11., 1981, Brasília. **Anais**. Brasília: SBEA, 1983. p.843-844.
- AZEVEDO, J.A. de; SILVA, E.M. da; RESENDE, M.; GUERRA, A.F. **Aspectos sobre o manejo da irrigação por aspersão para o cerrado**. Brasília: EMBRAPA-DID, 1986. 52p. (EMBRAPA-CPAC. Circular Técnica, 16).
- BENAMI, A. Sprinkler irrigation. In: FINKEL, H.J. (Ed). **Handbook of irrigation technology**. Boca Raton: CRC Press, 1982. 369p.
- BRIDI, S. **Análise de uniformidade da distribuição de água em sistema de irrigação por pivô central**. Viçosa: UFV, 1984. 87p. Tese Mestrado.
- CEMIG. **Estudo de otimização energética**: setor irrigação-pivô central. Belo Horizonte: CEMIG/UFV, 1993. 22p.
- COTRIM, C.E.; BERNARDO, S.; SEDIYAMA, G.C.; SOARES, A.A.; DENÍCULI, W. Desempenho de um sistema de irrigação do tipo pivô central de baixa pressão. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 33, p.21-27, 1988.
- FARIA, R.T. de; COSTA, A.C.S. da. **Tensiômetro**: construção, instalação e utilização. Londrina: IAPAR, 1987. 22p. (IAPAR. Circular, 56).
- HEERMANN, D.F.; HEIN, P.R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.11, n.1, p.11-15, 1968.
- KELLER, J. Sprinkler irrigation. In: SOIL CONSERVATION SOCIETY. **National engineering handbook**. 2. ed. Washington, 1979. cap.11.
- KLAR, E. **Irrigação**: frequência e quantidade de aplicação. São Paulo: Nobel, 1991. 156p.
- MERRIAN, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation**: a guide for management. Logan: Utah State University, 1979. 271p.
- MERRIAN, J.L.; KELLER, J.; ALFARO, J. **Irrigation system evaluation and improvement**. Logan: Utah State University, 1973. 164p.
- REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. Piracicaba: McGraw-Hill, 1978. 119p.
- SAAD, A.M.; LIBARDI, P.L. **Uso prático do tensiômetro pelo agricultor irrigante**. São Paulo: IPT, 1992. 27p.

SCALOPPI, E.J. Eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n.16, p.37-40, 1984.

SILVEIRA, P.M. da; STONE, L.F. Irrigação do feijoeiro por aspersão. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.17, n.178, p.28-34, 1994.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. **Irrigação do feijoeiro**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1986. 31p. (EMBRAPA-CNPAP. Circular Técnica, 20).

TREUENFELS, A. von; MENDES, A.A.T. **Irrigação: manual de manejo**. São Bernardo do Campo: ASBRASIL, 1985. 29p.

