

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e  
Tecnologia de Sementes



Tese

**SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA NA  
PRODUÇÃO DE SEMENTES**

**Vitor Emanuel Quevedo Tavares**

Pelotas, 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e  
Tecnologia de Sementes



Tese

**SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA NA  
PRODUÇÃO DE SEMENTES**

**Vitor Emanuel Quevedo Tavares**

Pelotas, 2007

**VITOR EMANUEL QUEVEDO TAVARES**

**SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE  
SEMENTES**

Tese apresentada à Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, sob a orientação do Prof. Dr. Silmar Teichert Peske, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Silmar Teichert Peske

Co-Orientador: Prof. Dr. Francisco Amaral Villela

Pelotas, 2007

Dados de catalogação na fonte:  
(Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744)

T231s Tavares, Vitor Emanuel Quevedo  
Sistemas de irrigação e manejo de água na produção de sementes  
/ Vitor Emanuel Quevedo Tavares. – Pelotas, 2007.  
182f.: tab. il.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e  
Tecnologia de Sementes. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel.  
Universidade Federal de Pelotas. – Pelotas, 2007, Silmar Teichert  
Peske, Orientador.

1. Sistemas de irrigação 2. Sementes 3 Manejo da irrigação  
4 Irrigação por aspersão I. Peske, Simar Teichert (orientador) II. Título.

CDD 631.587

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha filha Gabriela, que é uma semente muito especial, com a qual Deus me presenteou, e à minha esposa Margareth, cujo carinho e apoio, em todos os momentos, me enchem de certeza de que minha vida é muito boa.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus, por tudo.

Agradeço ao Prof. Silmar Teichert Peske, por seus ensinamentos pela atenção, pela orientação serena e objetiva, pela paciência, e pelo exemplo de postura profissional e pessoal. Ao Prof. Cesar Valmor Rombaldi, por me apontar um ótimo caminho, pelo incentivo e pelo apoio. Ao Prof. Francisco Amaral Villela, pelo aconselhamento. Aos professores, funcionários e alunos do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, pela acolhida em um ambiente tão marcado pelo profissionalismo e competência e, ao mesmo tempo, tão cheio de calor humano, que só pode ser explicado pela presença de pessoas que fazem o que gostam e gostam do que fazem. Aos colegas e amigos do Departamento de Engenharia Rural, pelo apoio incondicional. Aos meus orientados, que passaram por momentos de frágil orientação, mas que foram solidários e cumpriram seu papel com competência. Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, me apoiaram nesta caminhada.

"Assim como a semente traça a forma e o destino da árvore, os teus próprios desejos é que te configuram a vida."  
(Emmanuel)

## SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE SEMENTES

Autor: Vitor Emanuel Quevedo Tavares  
Orientador: Prof. Dr. Silmar Teichert Peske

**Resumo:** A produção de sementes de boa qualidade, de uma forma economicamente viável, invoca o uso adequado das tecnologias de produção disponíveis, como a irrigação, que é frequentemente associada à garantia e ao aumento da produtividade agrícola, de forma generalizada. Entretanto, diversos fatores contribuem para que os resultados econômicos alcançados fiquem aquém do potencial máximo que esta técnica possibilita. Entre estes fatores podem ser citados: a escolha, dimensionamento e operação inadequados dos sistemas, e o manejo inadequado da água em relação às características da cultura, do clima e do solo. No caso da aplicação da irrigação em áreas voltadas à produção de sementes, além dos fatores citados, ocorrem também deficiências ocasionadas pela não consideração das diferenças existentes entre as necessidades específicas das culturas, quando o objetivo é a obtenção de sementes de boa qualidade. Em culturas como soja, milho, algodão e feijão, especialmente em lavouras de maior porte, os sistemas de irrigação por aspersão, particularmente os mecanizados, estão sendo muito utilizados, o que, aliado à importância destas culturas no mercado brasileiro de sementes, torna necessário qualificar melhor a utilização destes sistemas. O presente trabalho apresenta um conjunto de orientações técnicas direcionado a técnicos, pesquisadores e estudantes envolvidos com o uso da irrigação, voltado para a produção de sementes. Inicialmente é abordado o contexto em que a irrigação está inserida, particularmente em relação à produção de sementes, posteriormente são apresentados os conceitos básicos relativos ao sistema solo-água-planta-atmosfera, em uma abordagem voltada à irrigação. Na seqüência, é abordada a questão da demanda de água pelas culturas e o manejo da irrigação, através da discussão dos fatores que o afetam, dos diferentes tipos de manejo, técnicas de monitoramento e das recomendações específicas para a produção de sementes. Em seguida, são abordados os principais sistemas de irrigação por aspersão, suas características, potenciais, limitações, critérios de escolha e dimensionamento. Por fim, são tratados os sistemas de elevação de água para irrigação, quanto ao dimensionamento, operação e manutenção.

Palavras-chave: Irrigação por aspersão, sementes, manejo da irrigação.

## IRRIGATION SYSTEMS AND WATER MANAGEMENT FOR SEED PRODUCTION

Student: Vitor Emanuel Quevedo Tavares

Adviser: Prof. Dr. Silmar Teichert Peske

**Abstract:** High quality seed production, in an economically feasible way, demands for appropriate use of the available production technologies, like irrigation, which is often considered as a guaranteed way to improve and ensure yield. However, many factors contribute for not reaching the full economic results this technique allows for. Among these factors are inadequate system choice, design and operation and inappropriate water management related to climate, soil and plant characteristics. When irrigation is applied to seed production fields, the lack in considering the specific plant needs for high quality seed production is another failure factor to be added. For many crops, including soybean, corn, cotton and bean, the sprinkler irrigation use, mainly automated systems, is increasing, this fact, combined with the economic significance of these crops for the seed market, is putting pressure on the need for making better use of these systems. This text presents a set of technical directions intended for assisting personnel, students and researchers involved with high quality seed production oriented irrigation. The first section is addressed to the context where irrigation is inserted, mainly related to the seed production aspect. In the second section the concepts related to the air-water-soil-plant system are treated. The third section is dedicated to the crop water requirements and irrigation management, discussing intervening factors, management methods, monitoring techniques and specific recommendations for seed production. The fourth section is about sprinkler irrigation, including its characterization, potential advantages, restrictions and choice and design criteria. The last section covers the design, operation and maintenance of irrigation pumps.

Key-words: Sprinkler irrigation, seeds, irrigation management.

## Sumário

1	Contexto da irrigação .....	9
1.1	Introdução .....	9
1.2	Potencial da irrigação.....	10
1.3	Limitações da irrigação .....	12
1.4	Água e agricultura .....	13
1.5	Métodos e sistemas de irrigação .....	17
2	O sistema solo-água-planta-atmosfera .....	21
2.1	Introdução .....	21
2.2	A planta e a disponibilidade de água .....	22
2.3	Solo e disponibilidade de água .....	26
2.4	Clima .....	40
2.5	Considerações finais.....	60
3	Manejo da irrigação e demanda de água.....	62
3.1	Introdução .....	62
3.2	Importância do manejo adequado .....	62
3.3	Fatores que afetam o manejo .....	63
3.4	Demanda de água para irrigação .....	66
3.5	Freqüência de irrigação .....	69
3.6	Tipos de manejo e informações necessárias .....	73
3.7	Eficiência de irrigação .....	79
3.8	Outros aspectos relacionados ao manejo .....	86
4	Irrigação por aspersão .....	90
4.1	Introdução .....	90
4.2	Aspectos positivos .....	92

4.3	Limitações .....	93
4.4	Sistemas de irrigação por aspersão .....	94
4.5	Características e escolha dos aspersores .....	96
4.6	Aspersão convencional.....	105
4.7	Aspersão mecanizada .....	116
5	Elevação de água para irrigação .....	144
5.1	Introdução .....	144
5.2	Bombas hidráulicas.....	144
5.3	Princípio de funcionamento das bombas centrífugas.....	146
5.4	Dimensionamento do conjunto moto-bomba.....	147
5.5	Instalação, operação e manutenção de bombas.....	159
6	Exemplo de aplicação .....	166
7	Considerações finais.....	174
8	Referências.....	177

# **1 Contexto da irrigação**

## **1.1 Introdução**

A irrigação pode ser definida como o fornecimento controlado, por meios artificiais, de água ao solo, em quantidades e momentos adequados, tendo por finalidade garantir o suprimento das necessidades hídricas das plantas, de forma que as mesmas alcancem um desenvolvimento compatível com os objetivos do seu cultivo. A irrigação se faz necessária quando ocorre a falta, a insuficiência ou a má distribuição das precipitações pluviais.

No presente texto a irrigação será tratada como um conjunto de técnicas de fornecimento de água às culturas, que visa garantir ou aumentar a produção de sementes, com eficiência técnica e econômica.

A eficiência econômica é alcançada quando os benefícios líquidos (lucros) do produtor, obtidos com o uso da irrigação, são positivos e superiores aqueles que seriam obtidos sem o uso da irrigação.

A eficiência técnica engloba um conjunto maior de fatores, como a uniformidade na distribuição de água, a minimização do uso de água e a minimização dos impactos ambientais.

A implantação de um sistema de irrigação em uma determinada área, pode ser feita através de diferentes alternativas de projeto. O caminho para encontrar a melhor alternativa passa pela maximização da eficiência técnica e econômica.

O negócio de sementes no Brasil enfrenta desafios diários à sua manutenção e crescimento, como os prejuízos causados pela pirataria de sementes, a incerteza em relação às políticas governamentais relativas aos produtos geneticamente modificados, a necessidade de consolidar uma imagem positiva junto à opinião pública, relativa às questões de segurança alimentar e meio ambiente e os prejuízos causados pela ocorrência de períodos de excesso ou falta de chuva. Neste

contexto, a irrigação possui um importante papel, como ferramenta para a redução das incertezas em relação ao clima, eliminando ou reduzindo os riscos de prejuízos causados pela falta ou insuficiência de chuvas. Entretanto, para que cumpra este papel, a irrigação precisa ser feita de forma correta, o que envolve uma série de tomadas de decisão sobre o método e o sistema de irrigação a ser utilizado, a capacidade do sistema a ser instalado e sobre o manejo da irrigação. Estas decisões não são parte de uma receita pronta, pois dependem da sinergia entre as características de clima, solo, cultura, disponibilidade de água, entre outras, em cada local.

A irrigação, quando mal conduzida, além de não produzir os resultados esperados, pode causar perdas econômicas e degradação ambiental, descreditando a técnica e fazendo seus usuários enfrentarem pressões dos órgãos de fiscalização ambiental e da opinião pública.

O reconhecimento do potencial e das limitações da irrigação, dentro da cadeia produtiva, ainda é muito superficial, mas alguns setores já percebem melhor a necessidade de aperfeiçoar o uso da técnica. Um exemplo disto é a formação de parcerias entre empresas produtoras de sementes, colaboradores e órgãos de pesquisa buscando qualificar o uso da irrigação nas propriedades.

No setor de produção de sementes, a correta utilização da irrigação é importante não apenas para garantir a alta qualidade do produto, que será beneficiado como semente, mas, também, para garantir a produção e atender à demanda, assim como para que a semente produzida possa expressar plenamente seu potencial produtivo, comprovando sua qualidade.

Diante deste quadro, o presente trabalho visa contribuir para a qualificação do uso da irrigação, especificamente no que se refere à irrigação por aspersão, que tem apresentado um grande crescimento nas áreas de cultivo voltadas à produção de sementes.

## **1.2 Potencial da irrigação**

O uso da irrigação tem o potencial de proporcionar uma série de benefícios, cuja concretização depende tanto das condições locais onde a técnica seja aplicada, como da correta escolha, dimensionamento e manejo dos sistemas. Entre estes benefícios, pode-se citar:

- a) aumento de produtividade: controlando melhor a disponibilidade hídrica para as plantas é possível evitar a ocorrência de stress durante períodos em que os mesmos são prejudiciais ao rendimento das culturas;
- b) redução da incerteza: a variabilidade climática é um dos principais fatores de incerteza no planejamento das atividades agrícolas. Com a adoção da irrigação o produtor pode minimizar os riscos associados a falta ou insuficiência de chuvas. No setor de produção de sementes isto é ainda mais importante, pois pode propiciar a uma empresa a manutenção ou incremento de sua participação no mercado;
- c) mais de uma colheita por ano: algumas regiões apresentam temperaturas e horas de insolação adequadas ao cultivo de determinadas culturas durante praticamente todo o ano, porém, durante parte do ano, a produção só é possível mediante o uso da irrigação, pois as precipitações naturais são insuficientes para o desenvolvimento destas culturas;
- d) flexibilidade no planejamento: o melhor controle das condições de umidade do solo aumenta a flexibilidade em termos de datas de semeadura, permitindo um melhor escalonamento na programação das atividades de campo;
- e) aplicação mais eficiente de defensivos e fertilizantes: é possível fazer a aplicação de produtos químicos, defensivos agrícolas, via água de irrigação (quimigação), bem como de fertilizantes (fertirrigação). Estas técnicas oferecem vantagens como: aumento da velocidade de aplicação, menor necessidade de mão-de-obra, menor risco de contaminação para os operadores, menor custo e maior homogeneidade ou uniformidade nas aplicações e maior fracionamento das aplicações;
- f) melhor qualidade do produto: pode-se evitar a ocorrência de períodos de stress hídrico de pequena intensidade, mas que ocorrem em períodos críticos para a qualidade do produto;

- g) aumento da renda regional: o aumento da produção, seja via aumento de produtividade de áreas já exploradas, seja via utilização de áreas em locais ou épocas em que isto não seria viável sem irrigação, resulta em aumento da renda regional.

### **1.3 Limitações da irrigação**

Como toda técnica, a irrigação também apresenta uma série de limitações. A significância de cada uma delas é variável, em função do método de irrigação utilizado, das características de solo, clima e planta e da forma como a técnica é conduzida. Entre as principais limitações, pode-se citar:

- a) ocupação de área: a construção de canais para abastecimento dos sistemas resulta em redução da área disponível para a cultura;
- b) mecanização: canais e tubulações instalados sobre o terreno podem dificultar o trânsito de máquinas e equipamentos;
- c) problemas fitossanitários: a água de irrigação pode ser um veículo de transporte de patógenos e de sementes indesejáveis. Além disso, nos métodos que molham toda a planta, pode ser criado um microclima favorável ao surgimento de doenças e pragas;
- d) pressão sobre os recursos hídricos (quantitativa e qualitativa): a retirada de água para irrigação compete com as retiradas para outros usos, podendo gerar conflitos em locais onde as reservas hídricas não sejam suficientes. Além disso, o escoamento superficial e a percolação de água em áreas irrigadas pode causar o transporte de substâncias poluidoras para os corpos d'água superficiais e subterrâneos;
- e) custos de investimento: os custos iniciais dos sistemas de irrigação, especialmente dos sistemas pressurizados, é elevado;
- f) problemas operacionais e de manejo: a correta operação dos sistemas e o manejo da irrigação requerem mão-de-obra qualificada.

## 1.4 Água e agricultura

A água é um recurso indispensável para o desenvolvimento das atividades agrícolas. Sua disponibilidade, tanto em termos de quantidade, como em termos de qualidade, é fundamental para o desenvolvimento do setor primário. Por outro lado, as atividades agrícolas são responsáveis pelos maiores índices de utilização de água, tanto quando é considerada toda a água retirada, como quando é considerada a água efetivamente consumida. Em termos globais, comparando a utilização da água em usos municipais, usos industriais e usos agrícolas, a agricultura é responsável por pouco mais de 70% de toda retirada de água e mais de 90% da água consumida (SHIKLOMANOV et al., 1996), conforme ilustra a figura a seguir.

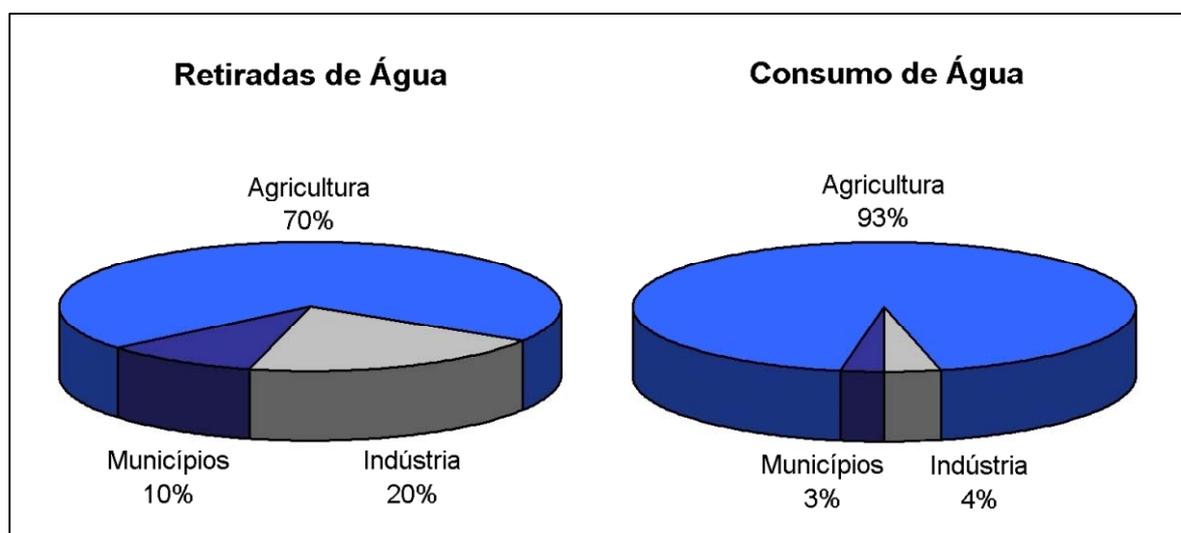


Figura 1.1 – Retirada e consumo de água por setor.

A dependência da agricultura, em relação à água, em conjunto com as mudanças que vêm ocorrendo nos padrões de consumo deste recurso (aumento na eficiência do uso industrial), bem como na legislação que regulamenta sua utilização, torna necessário considerar, com maior cuidado, algumas questões relativas ao uso da água na agricultura. Entre estas questões estão:

- a) o atendimento à legislação ambiental e de recursos hídricos;
- b) a necessidade de reduzir o consumo de água;
- c) a necessidade de reduzir o impacto ambiental provocado.

O planejamento e dimensionamento de projetos de irrigação e drenagem, deve levar em consideração a legislação que regulamenta este tipo de empreendimento. Além das normas específicas do setor de irrigação, devem também ser observadas as leis relativas ao uso da água em geral e a legislação ambiental.

A legislação que disciplina o uso da irrigação e da drenagem, apresenta três níveis de abrangência: federal, estadual e municipal. A definição de que normas devem ser observadas, depende de algumas características do empreendimento pretendido, como localização, área de abrangência, fonte de água, vazão e volume de água a serem utilizados, entre outras.

As propostas de instalação de sistemas de irrigação e drenagem devem ser submetidas ao órgão estadual responsável pela proteção ambiental (no Rio Grande do Sul, atualmente, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM), para obter as licenças ambientais previstas (prévia, instalação e operação) e ao órgão estadual responsável pela outorga de direitos do uso da água (atualmente, no Rio Grande do Sul, o Departamento de Recursos Hídricos – DRH), para obter a autorização para utilização do volume de água previsto.

Tanto a legislação ambiental, como a de recursos hídricos são relativamente recentes, estando ainda em fase de implementação e adaptação. Sendo assim, mudanças nos procedimentos de licenciamento são relativamente normais e freqüentes, exigindo constante atenção dos profissionais ligados ao setor.

#### **1.4.1 A disponibilidade de água**

O fato de que a água cobre 71% do nosso planeta, induz a maior parte das pessoas à idéia de que a água é um recurso ilimitado, sendo, dessa forma, tratada como um bem livre. De forma geral, até a segunda metade do século XX, esta forma de lidar com a água não representou maiores problemas, exceto para as regiões que apresentam problemas crônicos de disponibilidade de água. Entretanto, principalmente a partir da década de 70, no Brasil, uma série de fatores modificou o padrão de utilização dos recursos hídricos.

A explosão demográfica, a aceleração do processo de industrialização, a intensificação da agricultura e a expansão das fronteiras agrícolas, resultaram em um vertiginoso aumento da demanda de água e da quantidade e variedade de

substâncias jogadas nos corpos d'água. Como resultado, houve um acentuado declínio da qualidade e da quantidade de água disponível para as diversas atividades humanas, o que causou o surgimento e o agravamento de conflitos pelo uso da água. Esta nova situação, trouxe à tona a real situação da disponibilidade global de água, a qual indica que apenas aproximadamente 0,26% de toda água existente está realmente acessível para o uso (SHIKLOMANOV et al., 1996), conforme ilustra a figura a seguir.

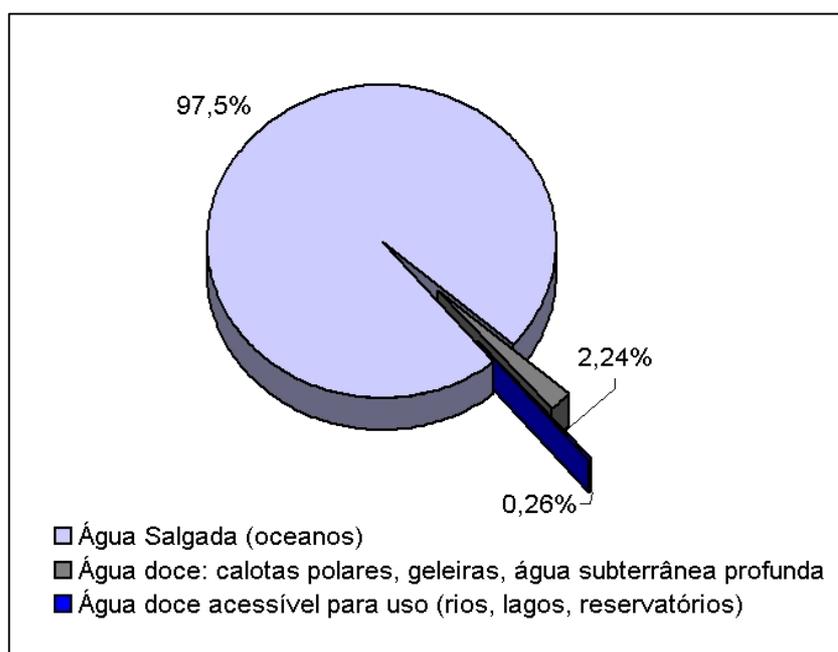


Figura 1.2 – Disponibilidade global de água.

Atualmente, é fácil identificar, na maioria das regiões, a existência de conflitos entre o uso da água para o abastecimento urbano, a diluição de efluentes industriais, a irrigação das lavouras e a conservação da qualidade ambiental. Mesmo em regiões consideradas privilegiadas quanto à disponibilidade de água, como a Região Sul do estado do Rio Grande do Sul, por exemplo, são encontrados problemas, entre os quais podem ser citados:

- a) poluição de praias por esgoto doméstico;
- b) conflito entre o uso da água para o abastecimento público e a irrigação de grandes áreas de arroz;
- c) contaminação de poços na zona rural;
- d) degradação de áreas de grande valor ambiental;

- e) aumento da ocorrência de imposição de racionamento de água em certos municípios.

Para fazer frente a esta nova situação, o Brasil, a exemplo de outros países, está adotando uma nova forma de gerenciar seus recursos hídricos, passando a tratar a água como um recurso escasso, dotado de valor econômico. Um dos reflexos dessa nova postura, é a adoção da cobrança pelo uso da água, como um dos instrumentos de gerenciamento dos recursos hídricos (TAVARES; RIBEIRO; LANNA, 1999).

O desenvolvimento da agricultura, diante deste cenário, requer de técnicos e produtores uma maior preocupação com o uso racional da água. Isto se aplica, diretamente ao uso da irrigação, que está se tornando cada vez mais popular, como forma de garantir e aumentar a produtividade da lavoura.

#### **1.4.2 Efeitos do uso inadequado da água na irrigação**

É comum encontrar sistemas de irrigação instalados, sem estudos prévios de viabilidade e sem um adequado dimensionamento de estruturas e equipamentos. Quando isto ocorre, não são conhecidas certas informações, indispensáveis para o dimensionamento racional do sistema, tais como:

- a) as reais necessidades de água da cultura;
- b) a capacidade de absorção e armazenamento de água do solo;
- c) o efeito do clima sobre o consumo real de água.

Sistemas instalados desta maneira, tendem a ter uma capacidade acima da ideal, para compensar a falta de informações. Este superdimensionamento dos sistemas de irrigação, acarreta uma série de conseqüências negativas, tanto do ponto de vista econômico como ambiental, causando uma redução da renda do produtor e também da renda regional.

Para exemplificar, observe-se o seguinte: um sistema superdimensionado, que faça uso de canais para a condução de água, irá resultar em canais maiores, aumentando os custos de construção e manutenção, além de uma maior ocupação de área, com conseqüente redução da área disponível para o plantio. Por outro lado, se forem utilizados sistemas de bombeamento, haverá necessidade de adotar conjuntos moto-bomba mais potentes, elevando o custo de aquisição dos equipamentos e os gastos com energia. Se forem utilizadas tubulações, estas terão

um diâmetro superior ao que seria utilizado se o sistema fosse adequadamente dimensionado, aumentando os custos do investimento.

A excessiva colocação de água, por sua vez, implica em um maior consumo deste recurso, aumentando os requerimentos de captação, elevação e condução de água. Ao mesmo tempo, uma quantidade de água aplicada, que exceda a necessidade da cultura, ou a capacidade de armazenamento do solo, irá ser perdida por escoamento na superfície ou por percolação para as camadas mais profundas do solo. Sendo assim, esta parcela da água aplicada, não ficará à disposição das plantas, o que significa desperdício de tempo e energia e, portanto, recursos financeiros.

Além de não ser utilizado pelas plantas, o excesso de água aplicado irá provocar o transporte das partículas mais finas do solo, ocasionando erosão superficial. Este excesso também promove a lavagem dos insumos aplicados na lavoura, como fertilizantes e herbicidas, que são transportados para os rios e lagoas ou para o lençol freático, provocando a contaminação dos recursos hídricos. Este processo, além de reduzir a renda do produtor, gera degradação ambiental e compromete uma série de atividades econômicas, como a aquicultura, por exemplo.

Analisando a situação apresentada, percebe-se que a busca de orientação técnica especializada, para a implantação, modificação e manejo de sistemas de irrigação e drenagem, é uma forma de reduzir o consumo de água e os custos do sistema, aumentando a renda do produtor e, ao mesmo tempo, diminuindo o impacto sobre outros usos da água e sobre o meio ambiente.

O grande peso da agricultura no uso dos recursos hídricos, torna necessária a formação e aperfeiçoamento de profissionais com uma nova mentalidade, capacitados para atuarem com uma visão ampla e de longo prazo a respeito dos aspectos econômicos, sociais e ambientais envolvidos no uso dos recursos hídricos.

## **1.5 Métodos e sistemas de irrigação**

Existe uma grande variedade de sistemas de irrigação, os quais, por sua vez, podem variar quanto ao uso de canais, tubulações e outras estruturas e equipamentos. Entretanto, é possível classificar os diferentes sistemas quanto ao método de irrigação caracterizado, dividindo em dois grandes grupos:

- a) métodos de irrigação por superfície, também denominados métodos não pressurizados ou por gravidade;
- b) métodos de irrigação pressurizados ou sob pressão.

A diferença entre estes métodos reside na forma como a água é distribuída sobre o solo, dentro da parcela irrigada, sem levar em consideração os meios utilizados para conduzir a água desde a fonte de suprimento até a entrada da mesma.

Nos métodos de irrigação por superfície, ou não pressurizados, a distribuição da água, dentro da parcela irrigada, é feita sob condições de pressão atmosférica, pela ação da gravidade, em contraste aos métodos de irrigação sob pressão, que se caracterizam pela distribuição da água, dentro da parcela irrigada, através de condutos sob pressão.

A irrigação por inundação, de uma lavoura de arroz, por exemplo, caracteriza o uso de irrigação por superfície (não pressurizado), mesmo que na retirada de água da fonte de suprimento, ou na sua condução até a lavoura, seja feito uso de bombeamento e tubulações sob pressão. Em contrapartida, a irrigação por gotejamento, de uma área cultivada com tomateiro, por exemplo, caracteriza o uso de irrigação pressurizada, mesmo que a água seja derivada, por gravidade, de um reservatório elevado, através de tubulações com pressões pouco superiores à atmosférica.

Existem diversos métodos de irrigação, sendo que cada método pode apresentar variações na técnica de aplicação, estruturas e equipamentos utilizados, o que causa diferenças na sua classificação e mesmo a criação de subdivisões.

Entre os principais métodos de irrigação por superfície, pode-se citar:

- a) inundação;
- b) sulcos;
- c) faixas.

Por sua vez, os métodos de irrigação sob pressão podem ser divididos em:

- a) aspersão;
- b) localizada.

Existe ainda a subirrigação, também denominada irrigação subsuperficial ou drenagem controlada, que consiste na disponibilização de água às culturas por meio do controle do nível da superfície freática. Este método pode ser classificado como

um método de irrigação por superfície (BERNARDO, 2006), porém, as características peculiares do mesmo, bem como as diferentes alternativas de fornecimento de água ao perfil do solo, tornam possível sua classificação como uma categoria própria de métodos de irrigação.

Uma classificação dos principais métodos e sistemas de irrigação pode ser observada na Figura 1.3.



Figura 1.3 – Classificação dos principais métodos e sistemas de irrigação.

Nenhum dos sistemas de irrigação existentes pode ser considerado como a melhor opção para todas as situações. Existem diversos fatores importantes que devem ser considerados, no momento de definir qual método e sistema de irrigação deve ser adotado em cada condição. Entre estes fatores, podem ser citados:

- a) cultura;
- b) topografia;

- c) disponibilidade de água e fonte de suprimento;
- d) tamanho e formato da área;
- e) custo de investimento;
- f) quantidade e qualificação da mão-de-obra envolvida;
- g) fonte e disponibilidade de energia.

Outros fatores, relativos às características do produtor, podem ser relevantes nesta definição, como seu conhecimento e histórico relativo à irrigação, se é proprietário ou arrendatário, e a prévia existência de equipamentos no local, como tubulações e bombas, por exemplo.

Em culturas como soja, milho, algodão e feijão, especialmente em lavouras de maior porte, os sistemas de irrigação por aspersão, particularmente os mecanizados, estão sendo muito utilizados. Estes sistemas, nos últimos anos, têm sido objeto de uma série de inovações tecnológicas, tanto em relação à automação dos equipamentos, como quanto ao desenvolvimento de sistemas capazes de alcançar maior uniformidade na aplicação de água e que consomem menos energia. Estes fatos, aliados à importância das culturas citadas no mercado brasileiro de sementes, torna necessário qualificar melhor a utilização destes sistemas.

## **2 O sistema solo-água-planta-atmosfera**

### **2.1 Introdução**

Para projetar um sistema de irrigação eficiente e eficaz, é fundamental conhecer a quantidade de água que deve ser fornecida para as culturas e com que frequência isto deve ser feito. Na fase de planejamento da irrigação, devem ser determinadas as necessidades de água das culturas em seus períodos de pico de demanda, quando os intervalos entre irrigações (frequência de irrigação) serão menores, ou a quantidade de água aplicada será maior.

A utilização de valores exagerados da demanda de água pelas culturas, ou do intervalo entre irrigações, podem conduzir à implantação de sistemas superdimensionados, acarretando gastos desnecessários em equipamentos e consumo exagerado de água e energia, causando uma série de efeitos negativos, como abordado no capítulo anterior. Por outro lado, se os valores utilizados ficarem aquém das reais necessidades das culturas, podem ocorrer perdas na produção, causadas pela insuficiência de água ou dificuldades de gerenciamento da irrigação, causadas pela incapacidade do sistema atender a demanda de água no tempo planejado. Um programa de produção de sementes requer ainda mais atenção sobre estes aspectos, pois o excesso ou a falta de água, além de comprometer a produção, impedindo o atendimento da demanda, podem afetar seriamente a qualidade do produto.

Em alguns casos, quando um novo projeto vai ser implantado, o planejador pode encontrar dados locais, já disponíveis, a respeito da demanda de água da cultura e da frequência de irrigação recomendada. Entretanto, em muitas situações, o profissional não encontrará dados experimentais disponíveis, visto que a coleta destes dados requer tempo e recursos financeiros. Sendo assim, o profissional deverá fazer suas próprias estimativas sobre a quantidade e frequência de aplicação

de água. Tais estimativas requerem conhecimento sobre alguns conceitos básicos que envolvem a relação entre a planta, a água, o solo e a atmosfera. Tais conceitos serão abordados a seguir.

## 2.2 A planta e a disponibilidade de água

Isolando os demais fatores que afetam a produção (luminosidade, temperatura, sanidade, fertilidade, etc.), para que as plantas desenvolvam todo seu potencial produtivo, é necessário que encontrem condições ótimas de disponibilidade de água. A medida em que a disponibilidade de água se reduz, ocorre uma redução na taxa de crescimento das plantas (Figura 2.1).

Em geral, a taxa de decréscimo de produção, em relação à redução da disponibilidade de água, é mais suave na fase inicial do processo, tendo pouco impacto sobre a produtividade, mas torna-se significativa, a partir de um determinado ponto, que pode ser considerado o ponto crítico da cultura, ou seja, o ponto a partir do qual, a redução da disponibilidade de água causa perda acentuada da produtividade. Este ponto crítico varia entre plantas e entre as diferentes fases de desenvolvimento das mesmas.

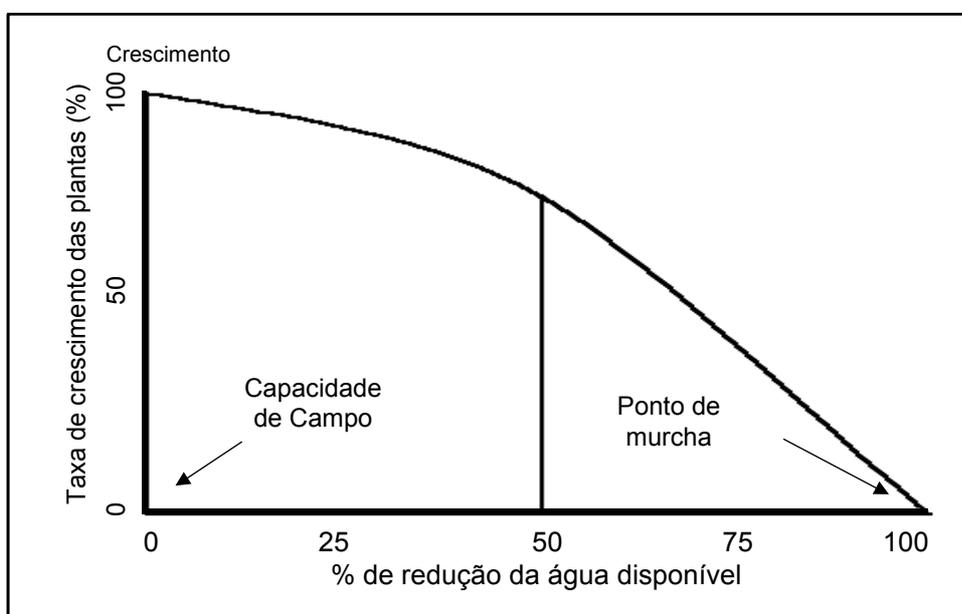


Figura 2.1 – Relação entre o crescimento vegetal e a diminuição da água disponível no solo na profundidade de solo considerada (adaptado de BRASIL, 1987).

### **2.2.1 Períodos de demanda**

Em termos de irrigação, existem períodos durante o ciclo da cultura que exigem maior atenção: o período de maior demanda de irrigação e os períodos críticos da cultura.

O período de maior demanda é o período em que ocorre a maior necessidade de irrigação, em termos de quantidade de água. Este é o período mais importante para as tomadas de decisão sobre o parcelamento da área e os equipamentos que devem ser utilizados. Neste período ocorre o pico de vazão da irrigação e é para esta situação que devem ser escolhidas as tubulações, bombas, motores e demais estruturas e equipamentos que sejam necessários para a irrigação.

Os períodos críticos correspondem aos períodos em que a planta apresenta maior sensibilidade à deficiência de água, ou seja, os períodos em que a ocorrência de déficits hídricos resultam em maiores perdas de produtividade. Nestes períodos o manejo da irrigação deve receber especial atenção, podendo ser modificado em relação aos demais períodos, de forma a garantir um suprimento de água adequado às plantas.

Em casos de estiagens severas e outras situações em que a disponibilidade de água possa ser insuficiente para atender toda a demanda da planta, o uso da água deve ser planejado de forma a garantir o suprimento durante os períodos críticos.

Na Tabela 2.1 são apresentados os períodos críticos de algumas culturas, enquanto que na Tabela 2.2 são apresentados os consumos totais de água, durante a irrigação, expressos em altura de lâmina de água.

### **2.2.2 Sistema radicular e extração de água**

O desenvolvimento do sistema radicular das plantas ocorre a diferentes profundidades, sendo influenciado pelo tipo de planta, além de outros fatores, como a disponibilidade de água às raízes e as características do perfil do solo relacionadas à sua resistência mecânica, aeração e fertilidade.

Tabela 2.1 – Períodos críticos de déficit de água de algumas culturas (adaptado de Klar, 1992).

<b>Culturas</b>	<b>Períodos críticos</b>
Alface	Requer sempre água, particularmente antes da colheita
Alfafa	Logo após o corte para o feno e do florescimento até a produção de sementes
Algodão	Florescimento e formação de capulhos
Aveia	Antes da emergência até a formação das espigas
Batata	Altos teores de umidade do solo após a formação dos tubérculos, e do florescimento à colheita
Beterraba açucareira	Três a quatro meses após a emergência
Brócolis	Durante a formação da cabeça
Cana-de-açúcar	Período de máximo crescimento vegetativo
Cítrus	Florescimento e formação de frutos. Para os limões, um florescimento mais intenso podem ser induzidos pela retirada de irrigação pouco antes do florescimento. A queda de frutos pode ser controlada por altos níveis de água
Feijões	Florescimento
Girassol	Durante o florescimento até a colheita
Melancia	Do florescimento à colheita
Milho	Período de polinização e formação de sementes
Morango	Do desenvolvimento dos frutos à colheita
Pêssego	Período de rápido crescimento dos frutos
Repolho	Durante a formação da cabeça
Soja	Florescimento, frutificação e, possivelmente, o período de crescimento vegetativo máximo
Sorgo	Formação das raízes secundárias, florescimento e enchimento dos grãos
Tomate	Florescimento vegetativo e crescimento dos frutos
Trigo	Durante o florescimento e enchimento dos grãos

Em termos de irrigação, a profundidade efetiva do sistema radicular é um dos parâmetros básicos para projetos e para o manejo da água. A profundidade efetiva ( $Z_e$ ) é a profundidade medida a partir da superfície do solo até onde se concentra a maior parte (75 a 90%) das raízes absorventes. A profundidade efetiva constitui a profundidade a ser umedecida pela irrigação.

Tabela 2.2 – Consumo de água estacional de algumas culturas (adaptado de Klar, 1992).

<b>Cultura</b>	<b>Consumo de água (mm)</b>
Abacate	650 - 1000
Alface	600 - 1500
Arroz	500 - 800
Banana	700 - 1700
Batata	350 - 800
Batata-doce	400 - 700
Beterraba açucareira	450 - 850
Café	800 - 1200
Cana-de-açúcar	1000 - 1500
Cebola	350 - 600
Cítrus	600 - 950
Coco	800 - 1200
Feijões	250 - 400
Hortaliças	250 - 500
Milho	400 - 700
Soja	450 - 800
Sorgo	300 - 650
Tabaco	300 - 500
Tomate	300 - 600
Videira	450 - 900

Quanto maior for a altura da camada de solo explorada pelo sistema radicular das plantas, maior será a lâmina de água disponível para consumo. Sendo assim, para plantas com sistema radicular mais profundo é possível utilizar lâminas de irrigação maiores (maior quantidade de água aplicada) e, em contrapartida, reduzir o número de irrigações ao longo do ciclo de desenvolvimento. Por outro lado, para plantas com sistema radicular superficial, será necessário adotar um sistema de manejo no qual são aplicados volumes menores de água (lâminas menores) em cada irrigação, mas com aumento do número de irrigações ao longo do ciclo da cultura.

Ao longo do perfil vertical do solo, podem existir camadas que sejam limitantes ao desenvolvimento do sistema radicular da planta. Estas camadas podem ser o resultado natural do desenvolvimento do solo, como no caso da existência de um horizonte B<sub>2</sub> textural, a pouca profundidade, como podem ser originadas por processos de compactação. Tais camadas também delimitam a profundidade do solo que deve ser umedecida pela irrigação.

Em solos profundos, em condições normais, o sistema radicular das plantas pode atingir maiores profundidades. Entretanto, em sua porção mais profunda a

quantidade de raízes tende a ser menor, representando uma pequena proporção do potencial de extração de água. Sendo assim, a irrigação não precisa ser planejada de modo a umedecer todo o perfil, correspondente à máxima profundidade do sistema radicular, mas para umedecer o perfil do solo até a profundidade em que ocorra uma parcela significativa da extração de água.

Na Tabela 2.3 são apresentados alguns valores de profundidade efetiva das raízes de algumas culturas.

Tabela 2.3 – Profundidade efetiva das raízes de algumas culturas (adaptado de Klar, 1992).

<b>Cultura</b>	<b>Profundidade (cm)</b>		
Alfafa	90	-	180
Algodão	40	-	100
Batata	30	-	75
Cana-de-açúcar	50	-	150
Cebola	20	-	60
Cereais	30	-	100
Citrus	50	-	150
Cucurbitáceas	50	-	100
Essências florestais	100	-	200
Feijões	30	-	60
Fumo	30	-	90
Hortaliças	20	-	40
Legumes	30	-	100
Milho	30	-	100
Morango	20	-	30
Pastagens	30	-	100
Pimentas	30	-	100
Soja	30	-	100
Tomate	30	-	100
Videira	50	-	100

### **2.3 Solo e disponibilidade de água**

Além de influenciar o crescimento do sistema radicular das plantas, o solo atua como um reservatório de água, a qual pode ser extraída pelas plantas, ou pode passar diretamente para a atmosfera. Entretanto, a atuação do solo como reservatório não ocorre de forma estática, mas de forma dinâmica, ou seja, o solo não responde sempre da mesma forma às demandas das plantas e da atmosfera. A maior ou menor força com que o solo retém a água armazenada depende, entre outros fatores, do próprio nível de armazenamento. Quanto maior a quantidade de

água armazenada, menor a força com que o solo retém a água, enquanto que a medida em que o solo vai secando, vai aumentando a força de retenção da água restante.

A força com que o solo retém a água é representada pela tensão da água no solo, enquanto que a medida da quantidade de água no solo é representada pela umidade do solo. A relação entre a tensão da água no solo e a umidade do solo é descrita pela curva de retenção de água no solo.

### 2.3.1 Umidade do solo

A umidade é um dos principais parâmetros para determinação da adequação do solo para a realização de uma série de operações. A maior ou menor velocidade, com que o solo perde umidade depende de uma série de fatores, como as características solo (textura, estrutura, etc.), a cobertura vegetal e o clima.

As duas principais formas de expressar a umidade do solo são as percentagens de água, em relação ao peso de uma amostra seca do solo, conhecida como umidade gravimétrica ( $U$ ), e em relação ao volume do solo, conhecida como umidade volumétrica ( $\theta$ ).

A umidade gravimétrica do solo pode ser calculada pela expressão:

$$U = \frac{P_u - P_s}{P_s} \cdot 100 \quad (2.1)$$

em que:  $U$  = umidade gravimétrica, em %;

$P_u$  = peso da amostra úmida, em g;

$P_s$  = peso da amostra seca, em g.

A umidade volumétrica do solo pode ser calculada pela expressão:

$$\theta = \frac{V_{\text{água}}}{V_{\text{solo}}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

em que:  $\theta$  = umidade volumétrica, em %;

$V_{\text{água}}$  = volume de água da amostra de solo, em  $\text{cm}^3$ ;

$V_{\text{solo}}$  = volume total da amostra de solo, em  $\text{cm}^3$ .

Estas duas formas de expressão do teor de umidade do solo podem ser correlacionadas, utilizando-se a densidade aparente relativa do solo ( $d_s$ ), através da expressão:

$$\theta = U \cdot d_s \quad (2.3)$$

em que:  $d_s$  = densidade relativa do solo, adimensional.

### 2.3.2 Tensão da água no solo

O solo é um sistema complexo, composto por uma série de partículas que constituem sua fase sólida; pela água, que constitui sua fase líquida e pelo ar, que constitui sua fase gasosa. No solo, as interfaces entre estas três fases são muito extensas, propiciando a ocorrência de uma série de fenômenos que interagem entre si, como a tensão superficial, coesão, adesão, adsorção e muitas outras. Para um solo não saturado, o resultado dessas interações pode ser representado pela pressão (potencial) da água no solo, a qual, para um mesmo solo, em um determinado ponto, varia em função da umidade. Quando o solo está saturado, a pressão da água em seu interior é positiva. Entretanto, quando a umidade do solo está abaixo do ponto de saturação (PS), a pressão se torna negativa. Quanto mais negativo for este valor, maior a força com que o solo retém a água. A medida da força com a qual o solo retém a água pode ser feita através da tensão da água no solo, cujo valor aumenta com a redução da umidade.

A textura e a estrutura do solo têm grande influência sobre a maneira como o solo retém a água. Em solos de textura mais fina, devido à distribuição mais uniforme dos poros e à grande área específica, a curva de retenção tem uma forma mais suave e os valores de tensão, para um mesmo valor de umidade, são mais elevados do que nos solos de textura mais grosseira. A Figura 2.2 apresenta a forma geral das curvas de retenção para solos argilosos e arenosos.

Existem alguns valores de umidade do solo que são de especial interesse para o planejamento da irrigação. Dentre eles estão o valor da umidade no ponto de saturação, na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente.

Ponto de saturação (PS): corresponde ao valor da umidade do solo em que todos os poros estão cheios de água.

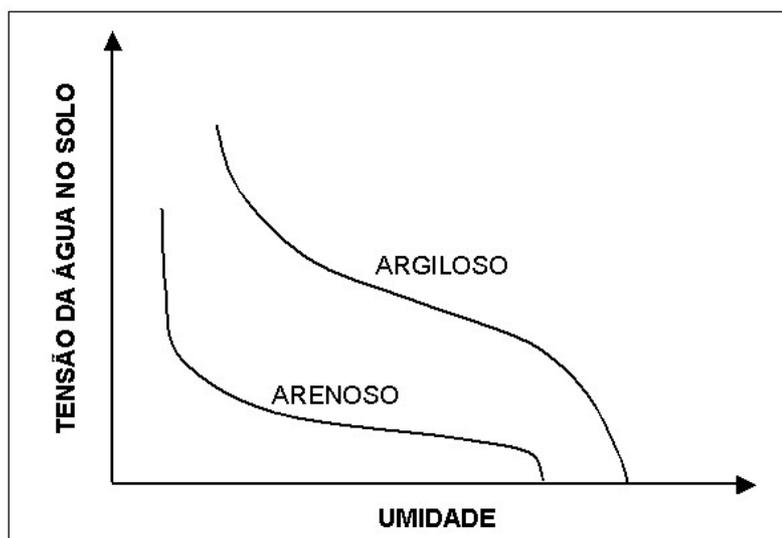


Figura 2.2 – Forma geral das curvas de retenção de água, para solos argilosos e arenosos.

Capacidade de campo (CC): corresponde ao valor da umidade que o solo, após ter sido saturado, atinge ao se esgotar o processo de drenagem natural. A capacidade de campo pode ser considerada como o limite superior da capacidade de retenção de água do solo. Para efeitos práticos, a capacidade de campo corresponde a tensões de água no solo que variam em torno de -0,05 a -0,33 bar (5 a 33 kPa).

Ponto de murcha permanente (PMP): corresponde ao valor da umidade no solo quando ocorre e persiste o murchamento das plantas, mesmo estando o ar saturado. O ponto de murcha permanente é utilizado como um indicador do limite inferior da capacidade de água disponível do solo, pois representa o valor da umidade, abaixo do qual a quantidade de água que a planta retira do solo é inferior à quantidade que ela transpira, aumentando o déficit de água na planta, de tal forma que a continuidade do processo causará a morte da mesma. Para a maioria dos cultivos agrícolas, é adequado considerar o ponto de murcha permanente como a umidade correspondente a uma tensão de água no solo de -15 bar (1,5 MPa).

As tensões correspondentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente sofrem variações em função do tipo de solo e planta, o que confere pouco significado físico aos valores médios acima especificados. Apesar disso, para a maioria das soluções práticas, estes valores são adotados para o cálculo da capacidade de água disponível (CAD) no solo para as plantas.

### 2.3.3 Capacidade de água disponível

Expressando a umidade com base no peso seco do solo, a capacidade de água disponível pode ser estimada através da equação:

$$CAD = \frac{(U_{CC} - U_{PMP})}{100} \cdot d_s \cdot Z_e \quad (2.4)$$

em que: CAD = capacidade de água disponível no solo, em mm;

$U_{CC}$  = umidade gravimétrica do solo na capacidade de campo, em %;

$U_{PMP}$  = umidade gravimétrica do solo no ponto de murcha permanente, em %;

$Z_e$  = profundidade efetiva do sistema radicular, em mm.

Se a umidade for expressa com base no volume, a CAD poder ser estimada da seguinte forma:

$$CAD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot Z_e \quad (2.5)$$

em que:  $\theta_{CC}$  = umidade volumétrica do solo na capacidade de campo, em  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ;

$\theta_{PMP}$  = umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente, em  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ .

A profundidade efetiva corresponde à profundidade do solo para a qual se deseja determinar a capacidade de armazenamento de água. Esta profundidade depende da caracterização do perfil do solo e do sistema radicular da cultura.

A capacidade de água disponível do solo é expressa nas mesmas unidades que a profundidade efetiva (geralmente mm ou cm), representando a altura da lâmina de água que o solo pode armazenar, entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente ao longo do perfil do solo, delimitado pela profundidade efetiva. Esse conceito implica que a água do solo entre a umidade correspondente à saturação e à capacidade de campo não fica disponível para as plantas, sendo removida pela ação da gravidade, da camada correspondente à profundidade efetiva, para as partes mais profundas do perfil do solo. Apesar do solo ainda conter água, abaixo do ponto de murcha permanente, esta parcela da umidade não é considerada no cálculo da CAD. Em termos de disponibilidade de água para as plantas, pode-se dizer que o reservatório do solo está cheio, quando é atingida a

capacidade de campo, e que está vazio quando é atingido o ponto de murcha permanente (Figura 2.3).

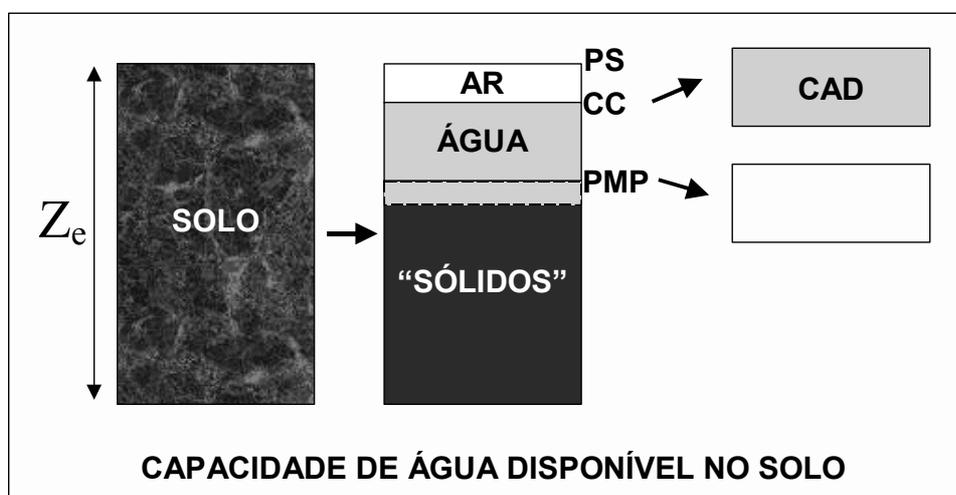


Figura 2.3 – Representação da capacidade de água disponível no solo.

Na ausência de precipitação, a umidade do solo decresce continuamente. Este decréscimo é mais rápido quando o solo está acima da capacidade de campo, pois a água retida nos macroporos é facilmente removida pela drenagem natural. O processo de evapotranspiração, que engloba a evaporação da água do solo e a transpiração das plantas, também reduz a umidade do solo. A partir do momento em que o solo atinge a capacidade de campo, o decréscimo de umidade se torna mais lento, pois a drenagem natural cessa, restando apenas o processo de evapotranspiração. Na medida em que o valor da umidade do solo se aproxima do ponto de murcha permanente a tensão da água no solo aumenta, dificultando a retirada de água pelo processo de evapotranspiração e desacelerando o decréscimo da umidade do solo.

Quando a umidade do solo está abaixo do ponto de saturação e ocorre uma precipitação, a parcela que infiltra no solo causa um aumento na umidade. A Figura 2.4 ilustra, de forma esquemática, o comportamento da umidade do solo, em função do tempo.

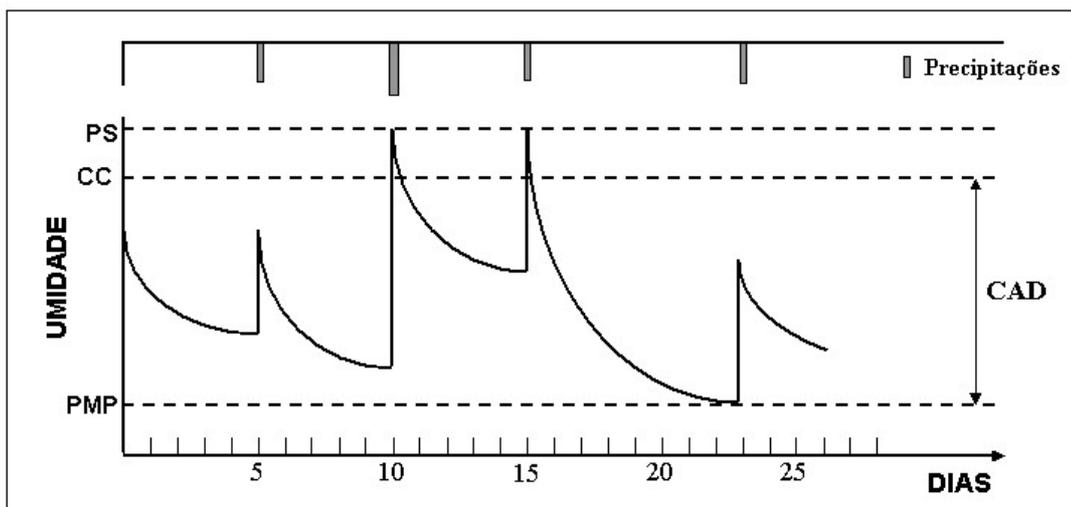


Figura 2.4 – Variação da umidade do solo em função do tempo e da ocorrência de precipitações.

### 2.3.4 Infiltração

A infiltração é o processo pelo qual a água penetra verticalmente no solo, através de sua superfície. A velocidade com que ocorre a penetração da água no solo é denominada taxa de infiltração, também conhecida como velocidade de infiltração, ou capacidade de infiltração, sendo geralmente expressa em cm/h ou mm/h. Quando a intensidade de precipitação é inferior à taxa de infiltração de água no solo, praticamente toda a água que atinge o solo infiltra, causando o aumento do teor de umidade. Por outro lado, quando a intensidade de precipitação supera a taxa de infiltração de água no solo, uma fração menor da precipitação irá infiltrar, aumentando a possibilidade de ocorrência de escoamento superficial. Deve ser salientado, entretanto, que a quantidade de escoamento superficial não depende apenas destes fatores, mas também da topografia da área. Em áreas planas o excedente da precipitação, em relação à taxa de infiltração, pode ficar acumulado na superfície, vindo a penetrar no solo mais tarde.

Conhecer o comportamento da taxa de infiltração (TI) do solo é de grande importância, quando se deseja caracterizar a contribuição da precipitação para o aumento do teor de umidade do solo. Após o início de uma precipitação, a medida em que aumenta o teor de umidade do solo, a taxa de infiltração vai diminuindo com o tempo. Persistindo a precipitação, a taxa de infiltração sofre uma redução gradual, cada vez menos intensa, até atingir um valor mínimo, a partir do qual se torna

constante. Este valor mínimo é denominado taxa de infiltração básica (TIB), também denominada velocidade de infiltração básica. A Figura 2.5 ilustra o comportamento da taxa de infiltração de água no solo (TI), durante a ocorrência de uma precipitação (P) de intensidade constante ( $I_p$ ), com uma certa duração ( $d_p$ ).

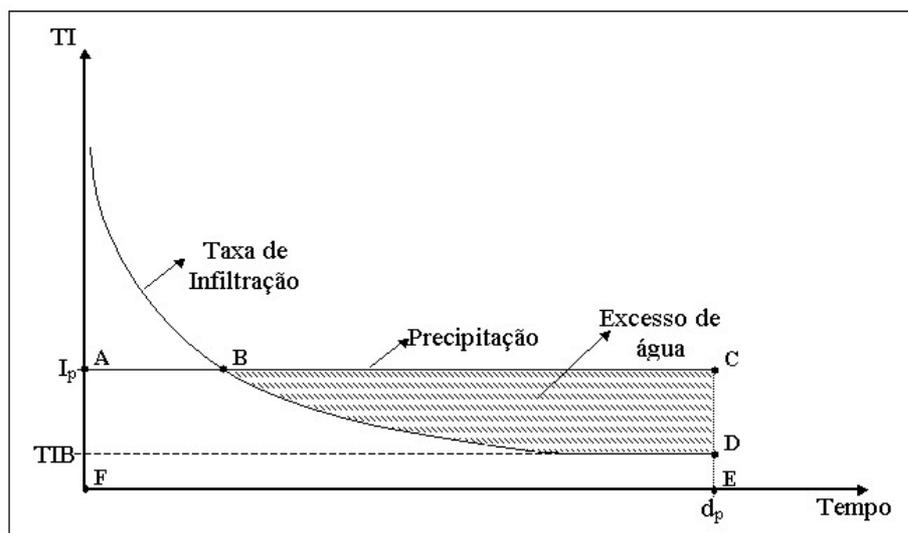


Figura 2.5 – Variação da taxa de infiltração em função do tempo e da ocorrência de precipitação.

Na Figura 2.5, a precipitação total, em termos de altura de lâmina de água, é representada pela área ACEFA. O ponto B identifica o momento em que a taxa de infiltração se torna inferior à intensidade de precipitação, quando começa a ser gerado o excesso de água, que poderá se transformar em escoamento superficial. A lâmina de água relativa ao excesso de água, pode ser obtida pela integração da área BCDB. A quantidade total de água que infiltra no solo é denominada infiltração acumulada ( $I_a$ ) e é obtida pela integração da área ABDEFA.

Existem diversos métodos para medir a taxa de infiltração de água no solo. Os mais comuns são os que envolvem a utilização de cilindros infiltrômetros, ou infiltrômetros de anéis. Em geral, o método consiste em cravar um cilindro metálico no solo e manter uma lâmina de água, de altura constante, no interior do mesmo. Em intervalos de tempo regulares, é medida a quantidade de água necessária para manter a altura da lâmina de água no interior do cilindro. Conhecidos os intervalos de tempo, as quantidades de água adicionadas e a área do cilindro, é possível calcular a taxa de infiltração do solo para cada intervalo. Vários fatores afetam a taxa

de infiltração medida com este método, entre eles: a altura da lâmina de água, a perturbação do solo pelo cilindro e a difusão lateral da água que infiltra. É comum a utilização de um segundo cilindro, externo ao primeiro, sendo mantida uma lâmina de água no espaço entre ambos, com o objetivo de diminuir a difusão lateral da água que infiltra no cilindro interno, bem como o efeito do próprio cilindro interno sobre a estrutura do solo. Uma descrição detalhada deste método pode ser encontrada em Cauduro e Dorfman ([1988]).

A realização de testes de infiltração, como o acima descrito, permite a obtenção das curvas de infiltração acumulada ( $I_a$ ) e de taxa de infiltração (TI) em função do tempo. Estas curvas apresentam a forma geral representada na Figura 2.6.

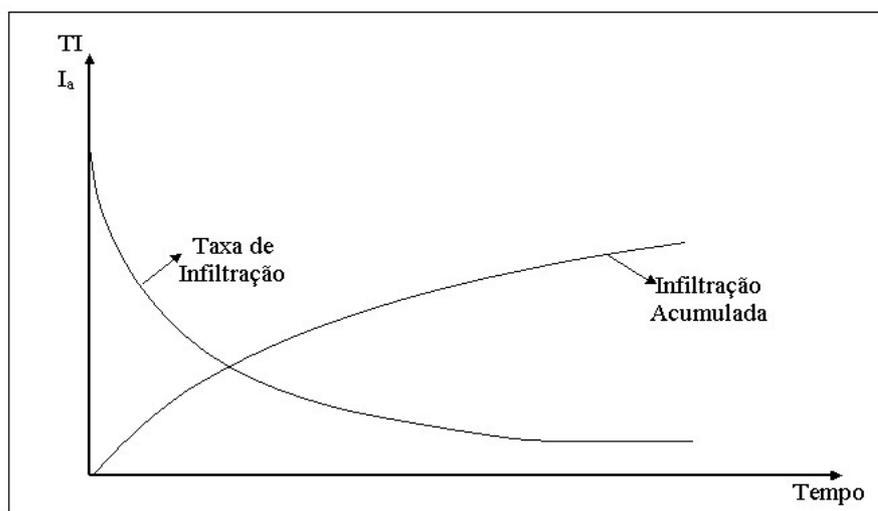


Figura 2.6 – Forma geral das curvas de infiltração acumulada e de taxa de infiltração em função do tempo.

As curvas de infiltração podem ser representadas por vários tipos de equações. Uma das formas mais utilizadas é a forma potencial, a seguir apresentada:

$$I_a = a \cdot T^n \quad (2.6)$$

$$TI = n \cdot a \cdot T^{n-1} \quad (2.7)$$

em que:  $I_a$  = infiltração acumulada, em cm;

TI = taxa de infiltração, em  $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;

T = tempo, em minutos;

a = coeficiente que depende do tipo de solo;

n = coeficiente que varia entre 0 e 1 e depende do tipo de solo.

Os valores de  $n$  e  $a$  das equações 2.6 e 2.7, podem ser facilmente obtidos, a partir de um teste de infiltração de água no solo, como o teste dos cilindros concêntricos.

A Tabela 2.4 apresenta alguns valores aproximados da taxa de infiltração básica e da umidade correspondente à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, em função da textura do solo.

Tabela 2.4 – Relação aproximada entre a textura do solo, taxa de infiltração básica, capacidade de campo e ponto de murcha permanente (Klar, 1992).

Textura	Taxa de infiltração (mm·h <sup>-1</sup> )	Capacidade de campo* (%)	Ponto de murcha permanente* (%)
Arenoso	50 (25 a 250)	6,5 – 12	2 – 6
Limo-arenoso	25 (15 a 75)	10 – 18	4 – 8
Limo	12,5 (8 a 20)	18 – 26	8 – 12
Limo-argiloso	8 (2,5 a 15)	23 – 31	12 – 15
Argiloso	5 (1 a 15)	31 – 39	15 – 19

\*Base em % de peso de solo seco.

### 2.3.5 Lâmina de irrigação

A irrigação visa recolocar no solo a quantidade de água retirada de forma conjunta pelas plantas e pela atmosfera.

A quantidade de água que deve ser colocada no solo, no momento da irrigação, pode ser expressa como uma altura de lâmina de água. Esta altura é denominada lâmina líquida e representa a quantidade de água que deverá ser fornecida pelo sistema de irrigação, para que o solo atinja a capacidade de campo.

A lâmina líquida é a quantidade de água que está compreendida entre a capacidade de campo (CC) e a umidade de irrigação (UI). A umidade de irrigação é o valor da umidade em que o solo se encontra no momento de iniciar a aplicação da água.

Considerando que o solo esteja inicialmente na capacidade de campo e que não ocorram precipitações, com o passar dos dias, a umidade do solo irá diminuindo gradualmente, até atingir o ponto crítico da cultura, a partir do qual a perda de

produtividade se torna significativa economicamente. Este ponto crítico corresponde à umidade de irrigação e varia de acordo com a cultura e com o estágio de desenvolvimento da mesma. O ponto crítico de cada cultura é definido pelo potencial (tensão) de água no solo abaixo do qual a planta começa a apresentar queda significativa de produtividade (Tabela 2.5).

A equação para determinação da lâmina líquida possui uma estreita relação com a da capacidade de água disponível no solo, podendo ser expressa como:

$$L_L = (\theta_{CC} - \theta_{UI}) \cdot Z_e \quad (2.8)$$

em que:  $L_L$  = lâmina líquida, em mm;

$$\theta_{UI} = \text{umidade de irrigação, em cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}.$$

Quando o solo atinge a umidade de irrigação (ponto crítico) não significa que o solo está sem água ou atingiu o ponto de murcha permanente. Neste ponto o solo ainda possui uma certa quantidade de água disponível, que a planta consegue extrair para o seu desenvolvimento, porém o déficit de água na planta causa perda de turgidez, reduzindo o crescimento celular.

A lâmina líquida também pode ser determinada a partir do estabelecimento de um valor permissível de déficit hídrico, ou seja, estabelecendo qual a fração da CAD que pode ser consumida, sem que ocorra queda significativa da produção. Esta fração é denominada déficit tolerável de manejo (DTM), também chamado déficit hídrico tolerável ou fator de disponibilidade, sendo utilizados valores mais baixos para culturas mais sensíveis ao déficit hídrico ou de maior valor econômico, ou em climas muito secos; enquanto que valores mais altos são adotados para culturas mais resistentes ao déficit de água, ou de menor valor econômico. Em geral, os valores de DTM variam de 0,2 a 0,6 (20 a 60% da CAD). O valor da lâmina líquida, em função do DTM, pode ser obtido por:

$$L_L = \text{DTM} \cdot \text{CAD} \quad (2.9)$$

em que: DTM = déficit tolerável de manejo, adimensional.

### 2.3.6 Água disponível

A água disponível (AD) é a quantidade de água disponível para as plantas presente no solo em um dado momento. Se for conhecida a umidade do solo no

momento considerado, denominada umidade atual (UA), a água disponível neste momento será aquela quantidade de água que se encontra entre a umidade atual e o ponto de murcha permanente. A lâmina de água presente no solo, correspondente à água disponível, pode ser determinada pela expressão:

$$AD = (\theta_{UA} - \theta_{PMP}) \cdot Z_e \quad (2.10)$$

em que: AD = água disponível no solo, em mm;

$\theta_{UA}$  = umidade volumétrica atual do solo, em  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Tabela 2.5 – Níveis mínimos de potenciais de água do solo para diversas culturas, em períodos de altas e baixas evapotranspirações (Klar, 1992).

<b>Cultura</b>	<b>Potencial de água do solo(bar)</b>
Alfafa	-0,50 a -1,00
Banana	-0,30 a -1,50
Feijões	-0,60 a -1,00
Repolho	-0,60 a -1,00
Cenoura	-0,50 a -0,70
Cítrus	-0,50 a -1,00
Trevos	-0,30 a -0,60
Algodão	-1,00 a -2,00
Cucurbitáceas	-1,00 a -2,00
Plantas ornamentais	-0,20 a -0,50
Videiras	-0,40 a -1,00
Pastagens	-0,40 a -1,00
Alface	-0,40 a -0,60
Milho	-0,50 a -1,00
Melão	-0,30 a -0,45
Cebola	-0,35 a -0,45
Ervilha	-0,30 a -0,80
Batata	-0,30 a -0,70
Arroz	Saturação (ou próximo)
Sorgo	-0,60 a -1,30
Soja	-0,50 a -1,00
Morango	-0,20 a -0,50
Beterraba açucareira	-0,50 a -0,80
Cana-de-açúcar	-0,60 a -1,50
Tomate	-0,40 a -1,00
Trigo	-0,40 a -1,00

Se a água disponível for calculada para o momento que antecede a irrigação, será obtida a quantidade de água que ainda resta no solo quando este alcançar o ponto crítico para a cultura. Neste caso, a água disponível corresponde à quantidade de água que está compreendida entre a umidade de irrigação e o ponto de murcha permanente, podendo ser expressa como:

$$AD_i = (\theta_{UI} - \theta_{PMP}) \cdot Z_e \quad (2.11)$$

em que:  $AD_i$  = água disponível no solo, no momento que antecede a irrigação, em mm;

A  $AD_i$  também pode ser expressa em função do déficit tolerável de manejo, na forma:

$$AD_i = (1 - DTM) \cdot CAD \quad (2.12)$$

Neste caso específico, a água disponível será a diferença entre a capacidade de água disponível e a lâmina líquida ( $L_L$ ), ou seja:

$$AD_i = CAD - L_L \quad (2.13)$$

Para que estas determinações possam ser feitas, é necessário dispor da curva característica de água no solo, determinada em um laboratório de solos, para o local do projeto, bem como dispor de um método que permita o monitoramento ou a estimativa da umidade do solo.

A escolha criteriosa da umidade de irrigação é muito importante, pois irá determinar a quantidade de água disponível que ainda restará no solo no momento da irrigação. Esta água disponível poderá ter uma função de reserva no caso de ocorrerem imprevistos que atrasem a irrigação, como faltas de energia por períodos prolongados causadas por panes em transformadores, falhas no suprimento de água causadas por panes no conjunto moto-bomba, rompimentos em tubulações ou em canais de condução de água, entre outros.

A Figura 2.7 ilustra a relação entre a umidade e a tensão da água no solo. A relação entre estas duas variáveis e a disponibilidade de água para as plantas pode ser descrita da seguinte forma:

- a) no ponto (a) o solo está em capacidade de campo e o reservatório de água para as plantas está cheio. A tensão da água no solo é

baixa, portanto as plantas conseguem realizar a extração de água sem perda de turgidez;

- b) no ponto (b) o solo atingiu a umidade de irrigação, sendo mostradas no detalhe as representações da lâmina líquida e da lâmina correspondente à água disponível neste ponto. Nesta situação, a tensão da água no solo atinge o ponto crítico para a cultura, ou seja, a partir deste ponto, a perda de turgidez pela planta resulta em queda significativa de produtividade;
- c) no ponto (c) o solo está em ponto de murcha permanente e o reservatório de água para as plantas está vazio. Embora ainda exista água no solo, a mesma está retida com uma tensão que impede a extração de água pela cultura.

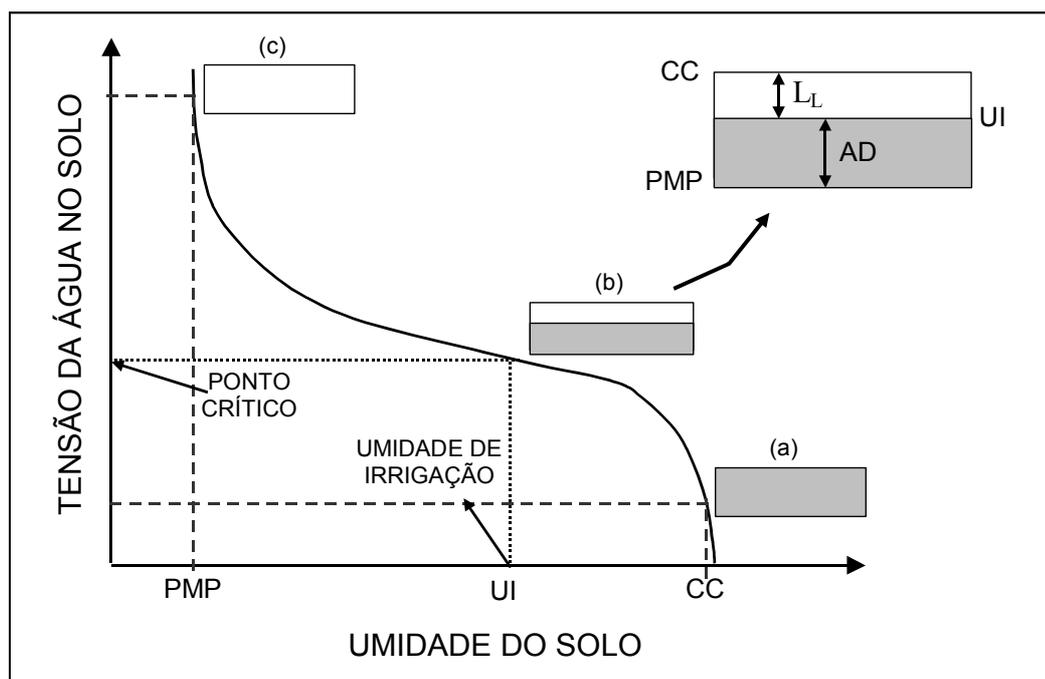


Figura 2.7 – Relação entre o potencial crítico da cultura e a umidade do solo na curva de retenção de água do solo.

### 2.3.7 Lâmina bruta

Os métodos de irrigação não são capazes de fornecer água ao solo com 100% de eficiência. Os diferentes métodos apresentam perdas de parte da água aplicada, ou seja, nem toda a água aplicada fica armazenada na camada de solo

correspondente à profundidade efetiva. As perdas que ocorrem podem ser ocasionadas por percolação profunda, por escoamento superficial e por evaporação. Sendo assim, deve-se acrescentar uma lâmina de água um pouco maior do que a lâmina líquida para compensar estas perdas.

A lâmina total de água aplicada, que engloba a lâmina líquida ( $L_L$ ) mais a água utilizada para compensar as perdas eventuais, é denominada lâmina bruta ( $L_B$ ). A razão entre a lâmina líquida e a lâmina bruta corresponde à eficiência de aplicação da irrigação. Quanto menores as perdas, mais a lâmina bruta se aproxima da lâmina líquida e a eficiência de aplicação se aproxima de 1,0 (100%). Conhecida a eficiência de aplicação esperada na irrigação, a lâmina bruta pode ser estimada pela expressão:

$$L_B = \frac{L_L}{E_a} \quad (2.14)$$

em que:  $L_B$  = lâmina bruta, em mm;

$E_a$  = eficiência de aplicação, em decimal.

Cada sistema de irrigação apresenta uma eficiência que varia em função de suas próprias características, das condições locais de implantação e do manejo do mesmo.

## 2.4 Clima

A demanda de água para irrigação é regulada pelo clima, através de um balanço entre as entradas e saídas de água no sistema solo-planta. De forma simplificada, pode-se dizer que as entradas são os aportes de água provocados pelas chuvas, enquanto que as retiradas são compostas pela ação conjunta da evaporação direta da água do solo e pela transpiração que ocorre na superfície das plantas. Se as entradas de água no sistema forem insuficientes para cobrir as retiradas, surge a necessidade da irrigação. Neste caso, a parcela das retiradas que não for coberta pelas entradas irá constituir a demanda de irrigação.

Naturalmente, não se pode atuar sobre o clima, entretanto, é possível estabelecer padrões de variação, associados a certos níveis de probabilidade. A grande variabilidade da demanda de água, de um ano para outro, acarreta um problema de gerenciamento em relação ao correto dimensionamento dos

equipamentos que serão utilizados. Para lidar com esta dificuldade, pode-se adotar diferentes formas de abordagem. Uma alternativa, seria a aquisição de equipamentos de grande porte ou em grande quantidade, visando atender à condição mais crítica, ou seja, de máxima necessidade de irrigação. Entretanto, esta alternativa implica em uma maior inversão de recursos financeiros e resultaria em elevados índices de ociosidade dos sistemas nos anos que apresentassem precipitações bem distribuídas, em níveis próximos ou superiores à média.

Uma outra abordagem para lidar com a variabilidade climática é a busca da maximização da relação custo-benefício, obtida quando a dimensão do projeto é aquela que maximiza a diferença entre os benefícios econômicos proporcionados pelo projeto e os custos de oportunidade do investimento realizado.

A segunda alternativa é mais racional, em termos de utilização de recursos financeiros, mas exige o estabelecimento de séries históricas que permitam a identificação do padrão de comportamento da demanda de água, devidamente atrelada a certos níveis de probabilidade e incerteza.

#### **2.4.1 Evapotranspiração**

A evapotranspiração engloba os processos de passagem direta da água do solo para a atmosfera e de retirada de água do solo pelas plantas (Figura 2.8). Parte da água retirada do solo pela planta, será utilizada para o desenvolvimento de seus tecidos, enquanto que outra parte voltará à atmosfera através da transpiração. Quando o valor da umidade do solo é igual ou inferior à capacidade de campo, a evapotranspiração é a principal responsável pela redução da umidade do solo.

Entre os principais fatores que afetam a evapotranspiração, pode-se citar: o clima, a cobertura vegetal e o teor de água do solo. Destes fatores, o clima é o que mais tem sido utilizado como base para estimativa da evapotranspiração, existindo uma enorme quantidade de fórmulas propostas com este objetivo.

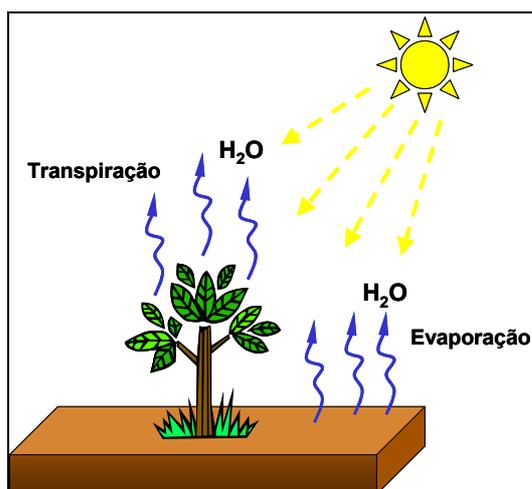


Figura 2.8 – Processo de evapotranspiração em uma superfície vegetada.

Em função de diferentes condições de cobertura vegetal e disponibilidade de água, existem diferentes formas de definição da evapotranspiração. As principais são a evapotranspiração de referência, a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração real, que podem ser definidas como segue (ALLEN et al., 1998):

- a) evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ): é a evapotranspiração que ocorre em uma superfície de referência, sem deficiência de água. A superfície de referência é representada por uma área coberta por grama, em condições específicas;
- b) evapotranspiração da cultura ( $ET_C$ ): é a evapotranspiração de uma cultura, livre de doenças, em qualquer fase de seu desenvolvimento, em condições ótimas de disponibilidade de água e nutrientes, para o desenvolvimento de seu potencial máximo de produção. A evapotranspiração da cultura, também é denominada de evapotranspiração potencial da cultura ou evapotranspiração máxima da cultura;
- c) evapotranspiração real ( $ET_R$ ): é a evapotranspiração que efetivamente ocorre na área cultivada com uma determinada cultura, em qualquer fase de seu desenvolvimento, em condições normais de disponibilidade de água e nutrientes. Como não existe a obrigatoriedade de manter a cultura sob condições ótimas de umidade, a  $ET_R$  será sempre menor, ou no máximo igual, à  $ET_C$ .

### 2.4.1.1 Evapotranspiração de referência

Para a determinação da demanda de irrigação, é necessário utilizar a evapotranspiração da cultura. Entretanto, as informações climáticas, disponíveis na maior parte das estações climatológicas, não permitem que se obtenha, de forma direta, o valor da  $ET_C$ . Por outro lado, a evapotranspiração de referência pode ser utilizada como base para a estimativa da  $ET_C$ .

As informações fornecidas pelas estações climatológicas permitem que sejam obtidas estimativas da evapotranspiração de referência. Os principais métodos para estimativa da  $ET_0$  podem ser classificados em:

- a) métodos baseados em tanques evaporimétricos;
- b) métodos baseados no uso de dados climáticos, em fórmulas empíricas;
- c) métodos baseados no uso de dados climáticos, em balanço de radiação.

A escolha do método de estimativa da evapotranspiração de referência depende da disponibilidade de dados meteorológicos e da escala de tempo requerida. O método baseado em balanço de radiação mais utilizado em estações climatológicas é o de Penman-Monteith, padrão FAO (Food and Agriculture Organization; ALLEN et al., 1998).

A Figura 2.9 ilustra as principais opções para a determinação da evapotranspiração.

Para utilização dos métodos empíricos é necessário conhecer as condições climáticas para as quais foram desenvolvidas, pois normalmente não são de aplicação universal.

A seguir serão apresentados alguns dos métodos mais utilizados para estimar a evapotranspiração de referência.

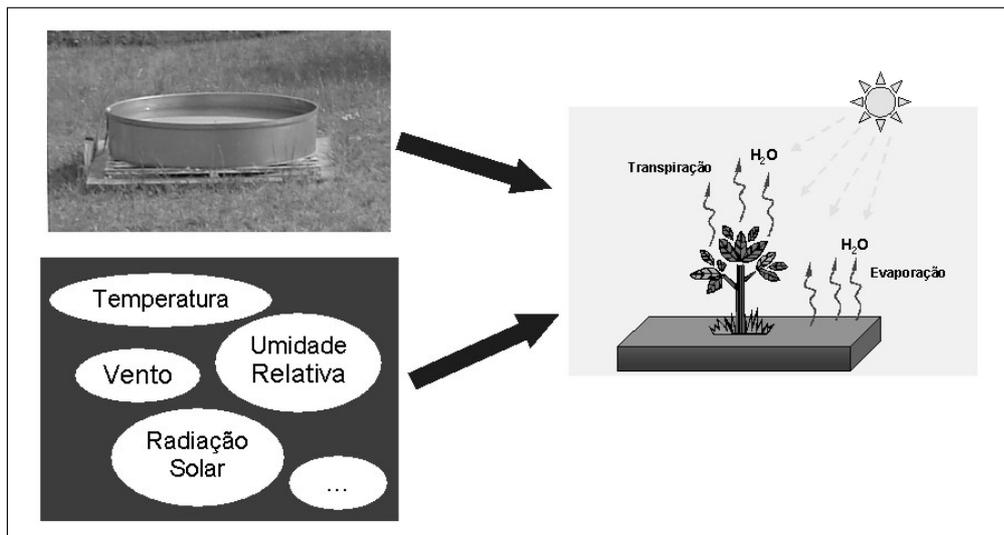


Figura 2.9 – Ilustração de duas alternativas de estimativa da evapotranspiração de referência.

#### 2.4.1.1.1 Método do tanque evaporimétrico

Este método consiste em utilizar a evaporação medida em um tanque contendo água, denominado tanque evaporimétrico, para estimar o valor da evapotranspiração de referência, através da equação:

$$ET_0 = K_p \cdot E_0 \quad (2.15)$$

em que:  $ET_0$  = evapotranspiração de referência ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );

$K_p$  = coeficiente do tanque;

$E_0$  = evaporação medida no tanque evaporimétrico ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

O tanque evaporimétrico mais utilizado nas estações climatológicas brasileiras é o tanque “Classe A”, desenvolvido pelo U.S. Weather Bureau, que é um tanque de forma circular, de chapa galvanizada ou aço inoxidável, com 121 cm de diâmetro e 25 cm de altura. O nível da água no interior do tanque deve ficar entre 2 a 7 cm da borda e a variação do nível não deve ultrapassar 2,5 cm. As medições devem ser feitas através de um micrômetro de gancho ou de uma régua, preferencialmente instalados em um poço tranqüilizador, no interior do tanque. O tanque deve ficar instalado sobre um estrado de madeira a 15 cm acima do solo.

Os valores do coeficiente do tanque dependem do tipo de tanque utilizado, das condições de instalação do tanque e de algumas condições climáticas. Os valores de  $K_p$ , para um tanque Classe A, são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Coeficientes  $K_p$ , para o tanque Classe A, em função da velocidade média do vento, bordadura ao redor do tanque na direção do vento e da umidade relativa do ar (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Velocidade do vento ( $m \cdot s^{-1}$ )	Raio de bordadura (m)	Umidade relativa					
		<40%	40-70%	>70%	<40%	40-70%	>70%
		Bordadura de grama			Bordadura de solo nu		
<2	1	0,55	0,65	0,75	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	0,50	0,60	0,70
2-5	1	0,50	0,60	0,65	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	0,50	0,60	0,65
	1000	0,70	0,80	0,80	0,45	0,55	0,60
5-8	1	0,45	0,50	0,60	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	0,50	0,55	0,65
	100	0,60	0,65	0,70	0,45	0,50	0,60
	1000	0,65	0,70	0,75	0,40	0,45	0,55
>8	1	0,40	0,45	0,50	0,50	0,60	0,65
	10	0,45	0,55	0,60	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	0,40	0,45	0,50
	1000	0,55	0,60	0,65	0,35	0,40	0,45

#### 2.4.1.1.2 Método de Thornthwaite

Este método é baseado na temperatura média mensal do ar e em um índice anual de calor. A fórmula de Thornthwaite pode ser apresentada como:

$$ET_o = 16 \cdot \left( 10 \cdot \frac{t_m}{I} \right)^a \quad (2.16)$$

em que:  $ET_o$  = evapotranspiração de referência, não ajustada, em  $mm \cdot mês^{-1}$ ;

$t_m$  = temperatura média mensal do mês considerado, em  $^{\circ}C$ ;

$I$  = índice anual de calor;

$a$  = constante que depende do índice anual de calor.

O índice anual de calor é obtido pela soma de doze índices mensais de calor, relativos a cada um dos meses do ano, ou seja:

$$I = \sum_{n=1}^{12} i_n \quad (2.17)$$

em que:  $i_n$  = índice mensal de calor, para cada um dos meses do ano, calculado como:

$$i_n = \left( \frac{t_{mn}}{5} \right)^{1,514} \quad (2.18)$$

em que:  $t_{mn}$  = temperatura média mensal, para cada um dos  $n$  meses do ano, em °C.

O valor de  $a$  é obtido pela seguinte equação:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,492 \quad (2.19)$$

O método de Thornthwaite não é o mais preciso e não é recomendado para períodos inferiores a um mês, mas é amplamente utilizado, devido à facilidade de obtenção dos dados necessários para sua aplicação. O método produz melhores resultados em regiões mais úmidas, enquanto tende a subestimar o valor da evapotranspiração em regiões mais secas.

Os valores de evapotranspiração, obtidos através da equação 2.16, são válidos para meses de 30 dias e 12 horas diárias de luz por dia. Como existem meses com diferentes números de dias e o número de horas de luz solar depende da latitude e do mês, os valores precisam ser ajustados para a latitude do local, para onde esteja sendo estimada a  $ET_0$ , bem como para o mês considerado. O fator de ajuste pode ser calculado por:

$$f = \frac{nh}{12} \cdot \frac{nd}{30} \quad (2.20)$$

em que:  $f$  = fator de ajuste para  $ET_0$ , adimensional;

$nh$  = número de horas de luz solar, para o mês e latitude considerados, em horas;

$nd$  = número de dias do mês considerado, em dias.

A Tabela 2.7 apresenta os valores do fator de ajuste, para o método de Thornthwaite, em função da latitude do local e do mês considerado.

Tabela 2.7 – Fatores de ajuste da evapotranspiração de referência, obtida pelo método de Thornthwaite, para ajuste ao número de dias do mês e à duração do brilho solar diário, nos vários meses do ano e latitudes entre o equador e 35°S (KLAR, 1992).

Hemisfério Sul												
Latitude	jan.	fev.	mar.	abr.	mai.	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
0°	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5°	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10°	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15°	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,06	1,07	1,12
20°	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22°	1,14	1,00	1,05	0,07	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23°	1,15	1,10	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24°	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25°	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26°	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27°	1,18	1,02	1,05	0,96	0,93	0,87	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28°	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29°	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30°	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31°	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32°	1,21	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23
33°	1,22	1,04	1,06	0,94	0,90	0,83	0,88	0,95	1,00	1,13	1,16	1,23
34°	1,22	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,16	1,24
35°	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25

#### 2.4.1.1.3 Método de Blaney-Criddle

Método baseado na temperatura média mensal e na porcentagem mensal de horas de luz solar, em relação ao total anual. A estimativa da evapotranspiração de referência é obtida pela equação:

$$ET_o = p \cdot (0,457 \cdot t_m + 8,13) \quad (2.21)$$

em que:  $ET_o$  = evapotranspiração de referência, em  $\text{mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ ;

$t_m$  = temperatura média mensal do mês considerado, em  $^{\circ}\text{C}$ ;

$p$  = porcentagem mensal de luz solar, em relação ao total anual, em % (Tabela 2.8).

O método de Blaney-Criddle foi desenvolvido em 1950, na região Oeste dos Estados Unidos, sendo mais indicado para regiões áridas e semi-áridas.

Tabela 2.8 – Porcentagens mensais de horas de sol em relação ao total anual, em função da latitude e do mês (KLAR, 1992).

Hemisfério Sul												
Latitude	jan.	fev.	mar.	abr.	mai.	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
0°	8,50	7,66	8,49	8,21	8,50	8,22	8,50	8,49	8,21	8,50	8,22	8,50
5°	8,68	7,76	8,51	8,15	8,34	8,05	8,33	8,38	8,19	8,56	8,37	8,68
10°	8,86	7,87	8,53	8,09	8,18	7,86	8,14	8,27	8,17	8,62	8,53	8,88
15°	9,05	7,98	8,55	8,02	8,02	7,65	7,95	8,15	8,15	8,68	8,70	9,10
20°	9,24	8,09	8,57	7,94	7,85	7,43	7,76	8,03	8,13	8,76	8,87	9,33
25°	9,46	8,21	8,60	7,84	7,66	7,20	7,54	7,90	8,11	8,86	9,04	9,58
30°	9,70	8,33	8,62	7,73	7,45	6,96	7,31	7,76	8,07	8,97	9,24	9,85
32°	9,81	8,39	8,63	7,69	7,36	6,85	7,21	7,70	8,06	9,01	9,33	9,96
34°	9,92	8,45	8,64	7,64	7,27	6,74	7,10	7,63	8,05	9,06	9,42	10,08
36°	10,03	8,51	8,65	7,59	7,18	6,62	6,99	7,56	8,04	9,11	9,51	10,21
38°	10,15	8,57	8,66	7,54	7,08	6,50	6,87	7,49	8,03	9,16	9,61	10,34
40°	10,27	8,63	8,67	7,49	6,97	6,37	6,76	7,41	8,02	9,21	9,71	10,49
42°	10,40	8,70	8,68	7,44	6,85	6,23	6,64	7,33	8,01	9,26	9,82	10,64
44°	10,54	8,78	8,69	7,38	6,73	6,08	6,51	7,25	7,99	9,31	9,94	10,80
46°	10,69	8,86	8,70	7,32	6,61	5,92	6,37	7,16	7,96	9,37	10,07	10,97

#### 2.4.1.1.4 Método de Penman-Monteith

A evaporação é o processo físico pelo qual um líquido passa do estado líquido para o vapor. Para que este processo ocorra, ou seja, para que haja a mudança de estado, é necessário a utilização de uma certa quantidade de energia. Os métodos baseados no balanço de energia estimam a evapotranspiração de referência a partir do uso de uma série de variáveis climáticas, como temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e outras, para realizar um balanço de energia e estabelecer uma correlação com a capacidade da atmosfera em retirar água do solo e das plantas. O método de Penman-Monteith é recomendado pela FAO (ALLEN et al., 1998).

Diversos estudos apontam o método de Penman-Monteith como sendo confiável (SOARES et al. 2001), com resultados superiores aos demais métodos, podendo ser utilizado para estimativa de evapotranspiração para diversos intervalos de tempo.

O cálculo da evapotranspiração diária de referência, na forma recomendada pela FAO, pode ser expresso como:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot V_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot V_2)} \quad (2.22)$$

em que:  $ET_o$  = evapotranspiração de referência, em  $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ;

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de vapor, em  $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$R_n$  = saldo de radiação disponível na superfície, em  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ;

$G$  = densidade do fluxo de calor do solo, em  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ;

$\gamma$  = constante psicométrica, em  $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$T$  = temperatura média diária a 2m de altura da superfície, em  $^\circ\text{C}$ ;

$V_2$  = velocidade do vento a 2m de altura da superfície, em  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$e_s$  = pressão de vapor na saturação média, em  $\text{kPa}$ ;

$e_a$  = pressão de vapor real do ar, em  $\text{kPa}$ ;

$e_s - e_a$  = déficit de pressão de vapor de saturação, em  $\text{kPa}$ .

O método de Penman-Monteith exige uma grande quantidade de dados climatológicos, alguns dos quais nem sempre estão disponíveis na maioria das estações climatológicas. Por este motivo, serão apresentadas, a seguir, formas de estimar os dados necessários para aplicação deste método, quando não for possível obter medições diretas. Para períodos superiores a 1 dia, os valores utilizados devem ser calculados pela soma dos valores diários, dividida pelo número de dias do período.

A declividade ( $\Delta$ ) da curva que relaciona a pressão de vapor na saturação com a temperatura pode ser obtida pela equação:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[ 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (2.23)$$

em que:  $\Delta$  = declividade da curva de pressão de vapor, em  $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$T$  = temperatura do ar, em  $^\circ\text{C}$ ;

$\text{Exp}(\dots)$  = 2,7183 (base do logaritmo natural) elevado à potência (...).

A pressão de vapor, para um certo período, deve ser calculada como a média das pressões de vapor, para as temperaturas máxima ( $T_{\text{max}}$ ) e mínima ( $T_{\text{min}}$ ) do período considerado. A FAO recomenda, como medida de padronização, que a temperatura média ( $T_{\text{med}}$ ), para períodos de 24 horas, seja considerada como a

média entre as temperaturas máxima e mínima diárias, ao invés da média das medições horárias (ALLEN et al. 1998).

$$T_{\text{med}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \quad (2.24)$$

A pressão de vapor na saturação ( $e^{\circ}$ ), é função da temperatura do ar e pode ser calculada pela expressão:

$$e^{\circ} = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right) \quad (2.25)$$

em que:  $e^{\circ}$  = pressão de vapor na saturação para a temperatura T, em kPa;

T = temperatura do ar, em °C;

Exp(...) = 2,7183 (base do logaritmo natural) elevado à potência (...).

Devido à não linearidade da equação anterior, é recomendável que a pressão de vapor na saturação, para determinados períodos, seja calculada a partir da média das pressões de vapor na saturação, para as temperaturas mínima e máxima do período, ou seja:

$$e_s = \frac{e^{\circ}_{(T_{\text{min}})} + e^{\circ}_{(T_{\text{max}})}}{2} \quad (2.26)$$

em que:  $e_s$  = média da pressão de vapor na saturação, em kPa;

$e^{\circ}_{(T_{\text{min}})}$  = pressão de vapor na saturação para a temperatura mínima do período, em kPa;

$e^{\circ}_{(T_{\text{max}})}$  = pressão de vapor na saturação para a temperatura máxima do período, em kPa.

O uso da temperatura média diária, no lugar das temperaturas mínima e máxima causa uma pequena subestimação no valor da evapotranspiração de referência.

Existem várias formas de estimar a pressão de vapor real ( $e_a$ ), utilizando diferentes tipos de dados, como a temperatura do ponto de orvalho, dados psicométricos ou dados relativos à umidade relativa do ar. A forma mais simples, embora pouco recomendada, é a baseada na umidade relativa do ar, que pode ser expressa como:

$$e_a = e_s \cdot \frac{UR_{med}}{100} \quad (2.27)$$

em que:  $UR_{med}$  = umidade relativa do ar média para o período, em %.

O saldo de radiação disponível na superfície ( $R_n$ ), é o balanço entre a energia absorvida, refletida e emitida pela superfície da terra. Este balanço, é a diferença entre a entrada líquida de radiação de ondas curtas ( $R_{ns}$ ) e a saída líquida de radiação de ondas longas ( $R_{nl}$ ). Este balanço pode ser expresso como:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.28)$$

em que:  $R_n$  = saldo de radiação disponível na superfície, em  $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ ;

$R_{ns}$  = entrada líquida de radiação de ondas curtas, em  $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ ;

$R_{nl}$  = saída líquida de radiação de ondas longas, em  $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ .

A entrada líquida de radiação de ondas curtas ( $R_{ns}$ ) é a fração não refletida da radiação solar que atravessa a atmosfera e atinge a superfície ( $R_s$ ). A fração da radiação solar que é refletida pela superfície é denominada albedo ( $\alpha$ ). Sendo assim,  $R_{ns}$  pode ser calculado por:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (2.29)$$

em que:  $R_{ns}$  = entrada líquida de radiação de ondas curtas, em  $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ ;

$\alpha$  = albedo, adimensional;

$R_s$  = radiação solar que atinge a superfície, em  $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ .

O valor do albedo, para cobertura vegetal verde, varia de 0,20 a 0,25. Para a cobertura de grama de referência, é assumido o valor 0,23.

Quando não se dispõe de medições diretas da radiação solar que atinge a superfície ( $R_s$ ), é possível estimar seu valor, através da fórmula de Angstrom:

$$R_s = \left( a_s + b_s \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (2.30)$$

em que:  $R_s$  = radiação solar que atinge a superfície, em  $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ ;

$n$  = número real de horas de insolação no período, em h;

$N$  = número máximo possível de horas de insolação para o período, em h;

$a_s$  = fração da radiação extraterrestre que atinge a terra em dias encobertos ( $n = 0$ );

$a_s + b_s$  = fração da radiação extraterrestre que atinge a terra em dias claros ( $n = N$ );

$R_a$  = radiação solar no topo da atmosfera, em  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ .

Os valores de  $a_s$  e  $b_s$  variam, em função das condições locais, sendo recomendado pela FAO a utilização de 0,25 e 0,50, respectivamente, para os locais onde estes valores não tenham sido calibrados. Entretanto é possível encontrar estes valores calibrados para diversas localidades brasileiras, para diferentes tipos de cobertura do solo. Para Pelotas, por exemplo, estes valores foram determinados para os doze meses do ano (STEINMETZ; ASSIS; SOARES, 1999), variando em torno de 0,20 e 0,56, respectivamente.

Os valores da radiação solar diária ( $R_a$ ), que atinge o topo da atmosfera, podem ser encontrados na Tabela 2.9, obtida a partir das fórmulas descritas por Allen et al. (1998). A Tabela 2.10 contém os valores médios do número máximo possível de horas de insolação diária ( $N$ ), para cada mês, em diferentes latitudes. Os valores relativos ao número real de horas de insolação ( $n$ ), devem ser obtidos a partir dos registros de estações climatológicas.

O fluxo de radiação de ondas longas, que sai da superfície da terra ( $R_{nl}$ ), em um período de 24 horas, pode ser estimado a partir da equação:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left( \frac{T_{\max K}^4 + T_{\min K}^4}{2} \right) \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left( 1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{SO}} - 0,35 \right) \quad (2.31)$$

em que:  $R_{nl}$  = saída líquida de radiação de ondas longas, em  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ;

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann ( $4,903 \cdot 10^{-9} \cdot \text{MJ}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ );

$T_{\max K}$  = temperatura máxima (absoluta) para o período de 24 horas, em K ( $K = ^\circ\text{C} + 273,16$ );

$T_{\min K}$  = temperatura mínima (absoluta) para o período de 24 horas, em K;

$e_a$  = pressão de vapor real do ar, em kPa;

$R_s$  = radiação solar que atinge a superfície da terra, em  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ;

$R_{SO}$  = radiação solar em dias claros (quando  $n = N$ ), em  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ .

De forma análoga à equação 2.30, o valor de  $R_{SO}$  pode ser calculado por:

$$R_{SO} = (a_s + b_s) \cdot R_a \quad (2.32)$$

Para altitudes diferentes do nível do mar, ou quando não são disponíveis valores de  $a_s$  e  $b_s$ , calibrados para o local, pode-se utilizar a equação:

$$R_{SO} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \quad (2.33)$$

em que:  $z$  = altitude do local, em m.

Na equação 2.31, o termo  $R_s/R_{SO}$  deve ser limitado a  $R_s/R_{SO} \leq 1,0$ .

Considerando que as variações do calor latente de vaporização, são pequenas, para temperaturas normais, em torno de 20°C, a constante psicométrica ( $\gamma$ ) pode ser calculada por:

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot P_{atm} \quad (2.34)$$

em que:  $\gamma$  = constante psicométrica, em  $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$P_{atm}$  = pressão atmosférica no local, em kPa.

Tabela 2.9 – Radiação solar diária, no topo da atmosfera ( $R_a$ ), em  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ , em função da latitude e do mês (média dos valores diários).

Mês	Latitude									
	5° N	0°	5° S	10° S	15° S	20° S	25° S	30° S	35° S	40° S
Janeiro	34,23	36,23	37,99	39,51	40,77	41,76	42,48	42,94	43,13	43,07
Fevereiro	36,05	37,39	38,46	39,26	39,77	40,00	39,94	39,61	38,99	38,11
Março	37,47	37,82	37,89	37,66	37,16	36,37	35,31	33,98	32,39	30,57
Abril	37,43	36,71	35,73	34,49	32,99	31,25	29,28	27,10	24,73	22,19
Maio	36,25	34,74	33,00	31,04	28,88	26,53	24,02	21,37	18,60	15,76
Junho	35,34	33,49	31,44	29,19	26,76	24,19	21,49	18,68	15,81	12,91
Julho	35,64	33,96	32,06	29,96	27,67	25,21	22,60	19,88	17,07	14,20
Agosto	36,72	35,70	34,43	32,91	31,15	29,18	27,00	24,64	22,12	19,46
Setembro	37,21	37,18	36,87	36,29	35,42	34,29	32,91	31,27	29,39	27,30
Outubro	36,24	37,27	38,03	38,51	38,71	38,62	38,25	37,60	36,68	35,50
Novembro	34,47	36,32	37,92	39,26	40,35	41,16	41,70	41,97	41,97	41,72
Dezembro	33,47	35,66	37,64	39,37	40,86	42,09	43,06	43,77	44,22	44,44

A pressão atmosférica pode ser obtida diretamente de informações climáticas ou estimada em função da altitude do local, pela equação:

$$P_{atm} = 101,3 \cdot \left( \frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26} \quad (2.35)$$

em que:  $P_{\text{atm}}$  = pressão atmosférica, em kPa;

$z$  = altitude do local, em m.

Tabela 2.10 – Valores máximos diários de horas de luz (N), em função da latitude e do mês, em horas (média dos valores diários).

Mês	Latitude									
	5° N	0°	5° S	10° S	15° S	20° S	25° S	30° S	35° S	40° S
Janeiro	11,75	12,00	12,25	12,51	12,78	13,06	13,36	13,69	14,06	14,48
Fevereiro	11,84	12,00	12,16	12,32	12,48	12,66	12,84	13,04	13,27	13,52
Março	11,97	12,00	12,03	12,05	12,08	12,11	12,14	12,18	12,21	12,26
Abril	12,11	12,00	11,89	11,77	11,65	11,53	11,40	11,25	11,09	10,91
Maio	12,23	12,00	11,77	11,54	11,30	11,05	10,78	10,48	10,15	9,78
Junho	12,28	12,00	11,72	11,43	11,13	10,81	10,47	10,10	9,69	9,21
Julho	12,26	12,00	11,74	11,48	11,21	10,93	10,62	10,29	9,91	9,49
Agosto	12,16	12,00	11,84	11,68	11,52	11,34	11,16	10,96	10,73	10,48
Setembro	12,02	12,00	11,98	11,96	11,93	11,91	11,88	11,85	11,82	11,79
Outubro	11,88	12,00	12,12	12,24	12,36	12,49	12,63	12,78	12,94	13,13
Novembro	11,77	12,00	12,23	12,47	12,71	12,97	13,24	13,54	13,87	14,26
Dezembro	11,72	12,00	12,28	12,57	12,87	13,19	13,53	13,90	14,32	14,79

Quando só estiverem disponíveis medições da velocidade média do vento para alturas diferentes de 2,0m, pode-se utilizar a seguinte fórmula de conversão:

$$V_2 = V_y \cdot \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot y - 5,42)} \quad (2.36)$$

em que:  $V_2$  = velocidade do vento a 2,0m de altura da superfície, em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;

$V_y$  = velocidade do vento a  $y$  metros de altura da superfície, em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Para períodos de tempo compreendidos entre um dia e dez dias, o valor do fluxo de calor do solo ( $G$ ) é muito pequeno, quando comparado ao saldo de radiação disponível na superfície ( $R_n$ ), podendo ser desprezado ( $G \approx 0$ ).

Para estimativas mensais da evapotranspiração, o valor de  $G$  pode ser obtido por:

$$G_i = 0,07 \cdot (T_{i+1} - T_{i-1}) \quad (2.37)$$

em que:  $G_i$  = densidade do fluxo de calor do solo no mês  $i$ , em  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ;

$T_{i-1}$  = temperatura média do ar no mês anterior, em  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{i+1}$  = temperatura média do ar no mês posterior, em  $^{\circ}\text{C}$ .

Se o valor da temperatura média do ar no mês posterior não for conhecida, pode ser utilizado:

$$G_i = 0,14 \cdot (T_i - T_{i-1}) \quad (2.38)$$

em que:  $T_i$  = temperatura média do ar no mês  $i$ , em °C.

A necessidade de determinação de uma grande quantidade de dados meteorológicos e de realização de alguns cálculos trabalhosos, têm sido um obstáculo à popularização do método de Penman-Monteith, no planejamento das atividades de campo. Entretanto, a facilidade crescente de acesso a dados climatológicos em formato digital e a planilhas de cálculo, aliados ao bom desempenho do método na estimativa da evapotranspiração, são fortes indicadores de uma rápida mudança neste quadro.

Na Figura 2.10 são mostrados alguns dos equipamentos existentes em uma estação agroclimatológica, cujas informações são utilizadas para estimativa da evapotranspiração de referência e na Figura 2.11 é mostrado um exemplo de planilha de cálculo da  $ET_0$  utilizada por equipe de pesquisadores da UFPel e EMBRAPA, em projeto de manejo de irrigação na região de Pelotas, RS.



Figura 2.10 - Vista de estação agroclimatológica (Pelotas, RS).

Cálculo da evapotranspiração de referência diária do mês de novembro														
Dias	HR(%)	t <sub>med</sub> (°C)	e <sub>s</sub> (kPa)	e <sub>a</sub> (kPa)	Δ(kPa/°C)	L(MJ/kg)	e <sub>s</sub> -e <sub>a</sub>	γ(kPa/°C)	W	n	N	Q <sub>o</sub>	P <sub>i</sub>	ET <sub>o</sub>
1	50	16,84	1,92	0,96	0,122	2,46	0,96	0,067	0,65	9,42	13,53	17,2	3,0	6,8427
2	49,75	18,96	2,19	1,09	0,137	2,46	1,10	0,067	0,67	14,12	13,53	17,2	2,5	8,9070
3	70	21,26	2,53	1,77	0,155	2,45	0,76	0,067	0,70	9,12	13,53	17,2	1,5	6,7782
4	65,5	21,14	2,51	1,64	0,154	2,45	0,87	0,067	0,70	7,00	13,53	17,2	2,6	6,1565
5	67,75	16,6	1,89	1,28	0,120	2,46	0,61	0,067	0,64	6,25	13,53	17,2	1,4	5,1002
6	73,75	16,84	1,92	1,41	0,122	2,46	0,50	0,067	0,65	3,17	13,53	17,2	0,8	3,7154
7	64,75	15,72	1,79	1,16	0,114	2,46	0,63	0,067	0,63	9,83	13,53	17,2	1,7	6,5103
8	66	16,58	1,89	1,25	0,120	2,46	0,64	0,067	0,64	12,03	13,53	17,2	1,8	7,5224
9	68,25	17,84	2,04	1,39	0,129	2,46	0,65	0,067	0,66	12,08	13,53	17,2	1,6	7,6576
10	69,75	18,8	2,17	1,51	0,136	2,46	0,66	0,067	0,67	8,95	13,53	17,2	2,1	6,6188
11	75,25	19,94	2,33	1,75	0,144	2,45	0,58	0,067	0,68	8,12	13,53	17,2	1,3	6,1610
12	74,5	22,26	2,69	2,00	0,163	2,45	0,68	0,067	0,71	10,67	13,53	17,2	1,2	7,4778
13	70,75	23,24	2,85	2,02	0,172	2,45	0,83	0,067	0,72	10,12	13,53	17,2	1,6	7,4485
14	75,5	22,3	2,69	2,03	0,164	2,45	0,66	0,067	0,71	9,20	13,53	17,2	1,5	6,9299
15	68	25,88	3,34	2,27	0,197	2,44	1,07	0,068	0,75	11,00	13,53	17,2	3,0	8,5086
16	66	22,38	2,71	1,79	0,164	2,45	0,92	0,067	0,71	8,08	13,53	17,2	2,0	6,5731
17	72,25	20,9	2,47	1,79	0,152	2,45	0,69	0,067	0,69	4,92	13,53	17,2	1,5	4,9279
18	77,5	20,76	2,45	1,90	0,151	2,45	0,55	0,067	0,69	4,27	13,53	17,2	1,0	4,4976
19	69,5	23,36	2,87	2,00	0,173	2,45	0,88	0,067	0,72	12,08	13,53	17,2	2,4	8,5666
20	67,75	23,4	2,88	1,95	0,174	2,45	0,93	0,067	0,72	12,08	13,53	17,2	2,5	8,5992
21	56,5	27,3	3,63	2,05	0,212	2,44	1,58	0,068	0,76	10,62	13,53	17,2	3,6	8,6326
22	69	27,32	3,63	2,51	0,213	2,44	1,13	0,068	0,76	13,00	13,53	17,2	0,5	8,8927
23	61,5	28,84	3,97	2,44	0,230	2,43	1,53	0,068	0,77	10,12	13,53	17,2	5,0	8,9223

Figura 2.11 - Exemplo de planilha de cálculo da evapotranspiração de referência.

#### 2.4.1.2 Evapotranspiração da cultura

Para uma mesma área, sob as mesmas condições climáticas e de disponibilidade de água, a evapotranspiração pode variar bastante de uma cultura para outra, ou mesmo para diferentes estágios de desenvolvimento de uma mesma cultura. Na maioria dos estudos que envolvem a realização de balanços hídricos, voltados ao processo de planejamento, o procedimento mais empregado para obter a evapotranspiração de uma determinada cultura, consiste na utilização de correlações preestabelecidas, com a evapotranspiração de referência. A equação a seguir, expressa este tipo de correlação:

$$ET_C = K_C \cdot ET_o \quad (2.39)$$

em que:  $K_C$  = coeficiente de cultura.

O valor de  $K_C$  varia com o tipo de cultura, com os estágios de desenvolvimento (Figura 2.12) e com o clima. Vários estudos apresentam valores de  $K_C$  para culturas específicas, para uma grande variedade de locais.

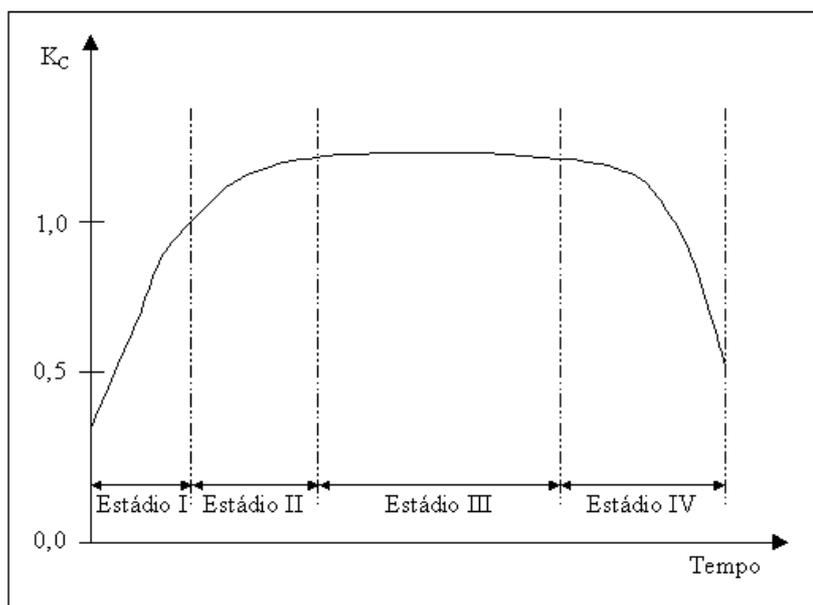


Figura 2.12 - Exemplo de variação do coeficiente de cultura durante o ciclo.

Na Tabela 2.11 são apresentados os valores do coeficiente  $K_C$  para algumas culturas, considerando cinco estágios de desenvolvimento.

Tabela 2.11 – Coeficientes de cultura em função do estágio de desenvolvimento, para diferentes culturas (Klar, 1992).

Cultura	Estágios de desenvolvimento da cultura				
	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)
Banana	0,5-0,55	0,7-0,85	1,00-1,10	0,90-1,00	0,75-0,85
Feijão	0,3-0,40	0,7-0,80	1,05-1,20	0,65-0,75	0,25-0,30
Algodão	0,4-0,50	0,7-0,80	1,50-1,25	0,80-0,90	0,65-0,70
Amendoim	0,4-0,50	0,7-0,80	0,95-1,10	0,75-0,85	0,55-0,60
Milho	0,3-0,50	0,8-0,85	1,05-1,20	0,80-0,95	0,55-0,60
Cebola	0,4-0,60	0,7-0,80	0,95-1,10	0,85-0,90	0,75-0,85
Ervilha	0,4-0,50	0,7-0,85	1,05-1,20	1,00-1,15	0,95-1,10
Pimenta	0,3-0,40	0,6-0,75	0,95-1,10	0,85-1,00	0,80-0,90
Batata	0,4-0,50	0,7-0,80	1,05-1,20	0,85-0,95	0,70-0,75
Arroz	1,1-1,15	1,1-1,50	1,10-1,30	0,95-1,05	0,95-1,05
Sorgo	0,3-0,40	0,7-0,75	1,00-1,15	0,75-0,80	0,50-0,55
Cana-de-açúcar	0,4-0,50	0,7-0,10	1,00-1,30	0,75-0,80	0,50-0,60
Fumo	0,3-0,40	0,7-0,80	1,00-1,20	0,90-1,00	0,75-0,85
Tomate	0,4-0,50	0,7-0,80	1,05-1,25	0,80-0,95	0,60-0,65
Trigo	0,3-0,40	0,7-0,80	1,05-1,20	0,65-0,75	0,20-0,25
Alfafa	0,3-0,40				1,05-1,20

I – emergência, até 10% do desenvolvimento vegetativo (DV); II – 10% até 80% do DV;  
 III – 80% até 100% do DV, inclusive frutos formados; IV – maturação; V – colheita.

### 2.4.2 Precipitação pluvial

O principal fator de aumento do teor de água do solo é a precipitação, sendo de grande importância para a determinação das necessidades de irrigação.

Em relação ao teor de água do solo, é preciso salientar que nem toda a água que precipita sobre uma determinada área irá realmente contribuir para aumentar a umidade. Sendo assim, deve-se recorrer a uma definição de “precipitação efetiva” (PE), como sendo a parcela da precipitação total, que atinge o solo, infiltra e fica retida na camada do solo para a qual se deseja acompanhar o comportamento da umidade. O conceito de precipitação efetiva varia em função da finalidade pretendida.

Vários são os fatores que concorrem para reduzir o valor da precipitação efetiva, como: a evaporação direta de parte da precipitação, que fica retida na cobertura vegetal (interceptação) e na superfície do solo (retenção superficial); o escoamento superficial e a percolação da água para zonas além da profundidade efetiva. A perda de água por interceptação depende do tamanho e forma das folhas, do estágio de desenvolvimento da cultura, da densidade de plantas e de fatores climáticos, como a umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a insolação. O escoamento superficial ocorre sempre que a intensidade da precipitação supera a taxa de infiltração do solo, sendo afetado pela textura e estrutura do solo, cobertura vegetal e pelo relevo. As perdas por percolação ocorrem quando a parte da precipitação que infiltra no solo faz com que o valor da umidade do solo ultrapasse a capacidade de campo.

Nem sempre se dispõe de dados sobre os valores das perdas por interceptação, retenção superficial, escoamento superficial e percolação, específicos para um determinado local. Nestes casos, uma alternativa seria a determinação a campo da correlação entre a precipitação efetiva e a precipitação total, o que demanda tempo e recursos financeiros. Outra alternativa, é o uso de um dos métodos empíricos existentes para estimar esta correlação. Um dos métodos mais conhecidos é o do Serviço de Conservação do Solo (Soil Conservation Service – SCS/USDA) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (MOHAN; SIMHADIRAO; ARUMUGAM, 1996), que correlaciona a precipitação efetiva com a capacidade de água disponível do solo e com a evapotranspiração. O fato deste

método ser dirigido para o uso de valores médios mensais limita a eficiência de sua utilização, pois para o planejamento da mecanização o ideal é a utilização de dados diários.

O SCS desenvolveu este método através da análise de séries históricas de longa duração de dados climáticos e de umidade do solo. Esta análise compreendeu 50 anos de dados de precipitação, em 22 estações experimentais, cobrindo diferentes condições de solo e clima. A precipitação efetiva foi obtida a partir de balanços hídricos diários do solo, considerando a capacidade de água disponível, a umidade, a evapotranspiração da cultura e o valor da umidade do dia anterior. Fatores como a intensidade da chuva e a taxa de infiltração do solo não foram considerados, como forma de tornar o método mais simples. O método é mais adequado para áreas onde ocorram chuvas de baixa intensidade e com altas taxas de infiltração da água no solo. De forma geral o método do SCS é satisfatório, podendo, após alguma verificação, ser aplicado para situações de campo (DASTANE, 1978).

A Tabela 2.12 apresenta os valores da precipitação efetiva média mensal, segundo o SCS, para uma capacidade de água disponível no solo, de 75 mm. Para outros valores da capacidade de água disponível, devem ser utilizados os fatores de correção apresentados na Tabela 2.13.

Tabela 2.12 – Precipitação pluvial efetiva média mensal, para capacidade de água disponível de 75 mm (DASTANE, 1978).

Evapotranspiração média mensal (mm)	Precipitação média mensal (mm)									
	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
12,5	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12
25,0	16	17	18	19	20	21	23	24	25	25
37,5	24	25	27	28	30	31	32	33	35	37
50,0		32	34	35	37	39	42	44	47	50
62,5		39	41	43	46	49	52	54	57	61
75,0		46	48	52	54	57	61	64	68	72
87,5			56	59	62	66	69	73	78	84
100,0			62	66	70	74	78	82	87	92
112,5			69	73	76	81	86	91	96	102
125,0				80	85	89	95	100	106	112
137,5				87	92	97	103	109	115	121
150,0				94	98	104	111	117	124	132
162,5				100	107	112	118	125	132	140
175,0					116	119	126	134	141	150
187,5					120	127	134	142	150	158

Tabela 2.13 – Fatores de correção (F) para capacidade de água disponível (CAD) diferente de 75 mm (DASTANE, 1978)

CAD	20	25	37,5	50	62,5	75	100	125	150	175	200
F	0,73	0,77	0,86	0,93	0,97	1,00	1,02	1,04	1,06	1,07	1,08

Por exemplo, para um solo que tenha uma capacidade de água disponível de 150 mm, em um mês que tenha precipitação média mensal de 100 mm e evapotranspiração média mensal de 125 mm, é obtida da Tabela 2.12 uma precipitação efetiva média mensal de 80 mm, que multiplicado pelo fator de correção 1,06 (obtido na Tabela 2.13) resulta em um valor final de 84,8 mm.

## 2.5 Considerações finais

O conhecimento das relações entre a água, a planta, o solo e a atmosfera, permite estimar a capacidade do solo como um reservatório de água para as plantas e a intensidade com que estas e a atmosfera irão retirar a água deste reservatório. Tais informações são fundamentais durante a fase de projeto, para o estabelecimento das dimensões do sistema de irrigação, ou seja, da sua capacidade de irrigar, bem como para estabelecer o manejo da irrigação que será utilizado. Na fase de operação do sistema, é o conhecimento destas relações que permitirá ao técnico adequar os intervalos entre irrigações e os valores das lâminas de água que devem ser aplicadas à realidade dinâmica da lavoura.

A maior parte dos problemas de baixa eficiência de irrigação está relacionada à falta de conhecimento sobre o assunto, considerado complexo por muitos técnicos, levando à adoção de formas simplificadas de manejo. Tal procedimento resulta, em alguns casos, em déficits hídricos que não são aparentes, mas que comprometem a produtividade e podem acarretar perdas na qualidade fisiológica das sementes. Em outros casos, a maioria, ocorre a colocação de água em excesso, em partes ou em toda a lavoura, o que, além do maior gasto de água e energia, pode gerar um ambiente favorável à proliferação de doenças, também comprometendo a qualidade das sementes.

Cientes da importância das informações climáticas para o adequado manejo dos sistemas de irrigação, algumas empresas, que comercializam equipamentos de

irrigação, também estão disponibilizando estações meteorológicas automáticas, dotadas de diversos sensores, desde pluviômetros até sensores de radiação.

A disponibilidade de planilhas eletrônicas e programas de cálculo de evapotranspiração, associada à crescente popularização das estações climatológicas automáticas, são fatores que contribuem para que métodos mais precisos de dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação sejam adotados, propiciando que os potenciais benefícios desta técnica se concretizem. Na produção de sementes, estes fatores permitem o aumento na eficiência de uso da água, com redução de custos e produção de sementes em maior quantidade e melhor qualidade.

### **3 Manejo da irrigação e demanda de água**

#### **3.1 Introdução**

De que maneira o produtor decide quando irrigar a lavoura e qual a quantidade de água que deve ser colocada?

A resposta para estas duas questões é o foco central do manejo da irrigação. Na verdade, o manejo da irrigação abrange diversos aspectos relacionados à distribuição de água na área irrigada. Entre estes aspectos, estão:

- a) a caracterização do método empregado para decidir o momento de irrigar e a frequência de irrigação a ser utilizada;
- b) o método utilizado para determinar o volume de água a aplicar e a quantidade de água a ser aplicada (lâmina de água);
- c) o sistema de divisão da área irrigada em parcelas de irrigação, também conhecidas como talhões;
- d) a adequação e eficiência do método de irrigação utilizado.

Estes e outros aspectos relacionados serão abordados nos itens a seguir.

#### **3.2 Importância do manejo adequado**

A irrigação é uma prática utilizada para fornecer água às plantas, de acordo com as necessidades destas, como forma de garantir ou aumentar o rendimento e a qualidade das sementes. Entretanto, o objetivo final é o aumento ou a garantia da renda do produtor. Para que este objetivo seja alcançado de forma mais eficiente, é necessário um correto manejo da irrigação, maximizando o retorno econômico dos investimentos feitos pelo produtor.

Quando mal conduzida, a irrigação pode ter sua eficácia comprometida, tanto pela colocação excessiva de água na área irrigada, como pela deficiência de água ou pela desuniformidade em sua distribuição.

A irrigação deve ser iniciada antes que a quantidade de água no solo fique abaixo do limite a partir do qual a perda de turgidez pela planta resulte em perda de produtividade.

A quantidade de água requerida por uma cultura e sua resposta à irrigação não são constantes. São variáveis que dependem dos estádios de crescimento, tipo de solo e das condições climáticas da região.

As culturas diferem entre si, quanto à tolerância à deficiência de água no solo. Enquanto algumas culturas apresentam maior resistência à falta de água, sem apresentar queda na produção, outras respondem de forma mais intensa a pequenas variações no conteúdo de água do solo. Mesmo considerando uma única cultura, a sensibilidade à deficiência de água apresenta variações ao longo do seu ciclo de desenvolvimento e entre cultivares.

Uma das etapas mais importantes nos projetos de irrigação diz respeito às decisões sobre a quantidade de água a aplicar e quando efetuar a irrigação (oportunidade da irrigação). Para que estas decisões possam ser adequadamente tomadas, é necessário conhecer os fatores que afetam o manejo da irrigação, como a cultura, o solo, o clima, as particularidades do local e as características do sistema de irrigação que será utilizado.

### **3.3 Fatores que afetam o manejo**

#### **3.3.1 Planta**

Diversos aspectos relacionados às plantas influenciam o manejo da irrigação.

O tipo, a forma e o tamanho do sistema radicular das plantas terão influência direta sobre o volume de solo que poderá ser utilizado para a extração de água, bem como sobre quais as camadas de solo que serão utilizadas.

A sensibilidade da planta aos déficits hídricos, ou seja, a maior ou menor tolerância à falta de água, irá influenciar o intervalo de tempo entre as irrigações (frequência de irrigação) e a quantidade de água a ser aplicada.

As repostas das plantas às variações da disponibilidade de água no solo, apresentam mudanças, para seus diferentes estádios fenológicos (etapas de desenvolvimento). Dessa forma, é indicado que o manejo da irrigação seja

estabelecido de forma que atenda às necessidades específicas das plantas, ao longo de suas diferentes fases de desenvolvimento.

A susceptibilidade das plantas ao ataque de pragas e ao surgimento de doenças, quando relacionada à condição de umidade do solo e ao microclima gerado pela irrigação, também é um fator que influencia as decisões sobre o manejo da irrigação, em termos de quantidade de água a aplicar, frequência de irrigação e até mesmo quanto ao horário da irrigação.

### **3.3.2 Solo**

O solo possui grande influência sobre o manejo da irrigação. A profundidade, a textura e a composição dos diferentes horizontes irão influenciar a forma e a distribuição das raízes das plantas, delimitando o volume efetivamente utilizado para a extração de água. Estes fatores também determinam a capacidade de armazenamento de água e a forma como o solo retém a água disponível, liberando-a para as plantas e para a atmosfera, com maior ou menor facilidade.

A passagem da água da superfície para o interior do solo (infiltração), proveniente das chuvas ou das irrigações, também depende destes fatores. O mesmo ocorre em relação à percolação, que é a passagem da água das camadas mais superficiais, onde se concentra o sistema radicular das plantas, para as camadas mais profundas, onde não ocorre aproveitamento de água pelas culturas.

### **3.3.3 Clima**

O clima é o principal regulador da demanda de água para irrigação, pois as condições climáticas, como temperatura, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento, entre outras, são responsáveis pelas retiradas de água, na forma de vapor, diretamente do solo (evaporação) e da superfície das plantas (transpiração). Por outro lado, as precipitações constituem a principal fonte natural de água para as plantas podendo ocorrer situações de escassez de água (déficit hídrico), quando as precipitações são em quantidades inferiores à demanda das plantas, bem como situações de excesso de água (excesso hídrico), quando ocorrem precipitações em quantidades superiores à capacidade de armazenamento do solo.

Uma diferença marcante entre o clima e os fatores anteriormente mencionados, é que enquanto as características do solo e da planta apresentam pouca variabilidade ao longo dos anos, as características climatológicas apresentam grande variabilidade e incerteza, obrigando os técnicos que elaboram os projetos de irrigação a fazer projeções baseadas no histórico climático da região.

### **3.3.4 Condições locais**

Entre as condições locais que afetam o manejo da irrigação, está a disponibilidade de informações, que diz respeito a fatores como: existência na propriedade de instrumentos para o acompanhamento (monitoramento) das condições climáticas e da umidade do solo, proximidade e acesso aos dados de estações climatológicas e disponibilidade de assistência técnica.

A topografia do local também exerce influência sobre o manejo da irrigação, uma vez que terrenos com maiores declividades favorecem o escoamento da água na superfície do solo, reduzindo o tempo disponível para a infiltração e podendo gerar problemas de uniformidade de distribuição de água, gerando acumulação nos pontos mais baixos e deficiência nos pontos mais elevados.

A disponibilidade de água para a irrigação é outro aspecto que deve ser considerado no estabelecimento do manejo, que deverá estar adequado à fonte de suprimento disponível (açude, arroio, poço, etc.) e aos volumes e vazões disponíveis ao longo do ciclo da cultura.

A realidade do produtor, em termos de disponibilidade de tempo, recursos financeiros e mão-de-obra, é um aspecto fundamental no planejamento da irrigação.

### **3.3.5 Características de comercialização do produto**

Aspectos relacionados com a finalidade e qualidade desejada para o produto também devem ser considerados no manejo da irrigação. Um exemplo típico, é o caso da produção de sementes, em que as características buscadas para o produto estão relacionadas com o rendimento de sementes, qualidade fisiológica e sanidade, entre outros.

### **3.3.6 Sistema de irrigação**

Cada sistema de irrigação apresenta características diferenciadas em termos de consumo de água, distribuição de água no perfil do solo, eficiência de aplicação, mão-de-obra requerida e possibilidades de parcelamento da área irrigada em talhões, entre outras. Todas estas características influenciam a forma como deve ser manejada a irrigação.

### **3.4 Demanda de água para irrigação**

A correta determinação da quantidade de água necessária para a irrigação é um dos principais parâmetros para que o planejamento, o dimensionamento e o manejo de um sistema de irrigação sejam feitos de forma adequada, bem como para a avaliação das necessidades de captação, armazenamento e condução de água, e avaliação das fontes de suprimento disponíveis.

Quando a quantidade de água a ser aplicada pela irrigação for superestimada, têm-se como consequência sistemas de irrigação superdimensionados, encarecendo o custo da irrigação por unidade de área. A aplicação de água em excesso poderá acarretar danos à cultura, lixiviação dos nutrientes e elevação do lençol freático, podendo acarretar perdas de produtividade. Por outro lado, quando a quantidade de água aplicada na irrigação for subestimada, tem-se o subdimensionamento do sistema de irrigação, podendo ocasionar baixa produção, incapacidade do sistema em irrigar a área de projeto, ou necessidade de realizar tarefas muito rapidamente, causando dificuldades gerenciais.

A demanda de água na irrigação é a diferença entre a água consumida pelo processo de evapotranspiração e a quantidade de água fornecida pelas chuvas, em determinado período de tempo (Figura 3.1).

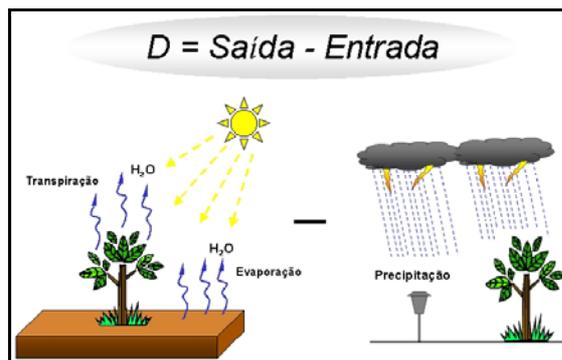


Figura 3.1 – Ilustração de demanda.

A demanda por irrigação pode ser expressa pela equação:

$$D = ET_C - PE \quad (3.1)$$

em que: D = demanda de água;

$ET_C$  = evapotranspiração da cultura;

PE = precipitação efetiva.

Na determinação da demanda existem outras variáveis envolvidas, mas como suas grandezas são pequenas, comparadas com a evapotranspiração e a precipitação, podem ser desprezadas.

Um outro aspecto importante, quando se trabalha com  $ET_C$  e PE, para estabelecer a demanda por irrigação, é a característica climática da região onde será implantado o sistema de irrigação, sendo necessário diferenciar regiões de clima úmido ou seco.

Em regiões onde as precipitações ocorrem durante todo o ano, porém em quantidades insuficientes em algumas épocas, como é o caso do Rio Grande do Sul, faz-se irrigação suplementar, ou seja, o sistema de irrigação irá repor somente a parcela da demanda que a precipitação não é capaz de suprir. Neste caso a demanda é determinada da forma apresentada anteriormente.

Em regiões de clima árido ou semi-árido, como os valores de precipitação são muito baixos, ou ainda em regiões que apresentem estações secas bem definidas, a precipitação pode ser considerada desprezível para o cálculo da demanda, a qual pode ser considerada igual à  $ET_C$ . Neste caso a irrigação é classificada como irrigação total ou integral. O mesmo se aplica para culturas produzidas em ambientes protegidos.

### 3.4.1 Fases de planejamento e operação

Quando se pretende utilizar a umidade do solo para determinar as necessidades de irrigação, em nível operacional, ou seja, a curto prazo, é necessário recorrer a métodos que permitam determinar ou estimar rapidamente a umidade. Algumas alternativas são os métodos diretos de determinação, como o método das pesagens, ou o uso de métodos indiretos, como tensiômetros e sonda de nêutrons. Outra opção é a utilização do balanço hídrico do solo, para estimar o conteúdo de umidade do mesmo.

Entretanto, quando o objetivo é a determinação, a longo prazo, da necessidade de água em um determinado período, visando o planejamento da irrigação e o dimensionamento dos equipamentos, deve-se recorrer a séries históricas de déficits hídricos. No caso da umidade do solo, são raros os locais onde existem séries históricas de medições diretas desta variável (ou da tensão da água no solo), sendo necessário recorrer a séries disponíveis de dados meteorológicos, para realização de balanços hídricos que permitam obter séries históricas de demanda de água.

Na fase de elaboração de um projeto de irrigação o ideal seria a utilização de dados diários para fazer as estimativa, entretanto, em muitos casos, são encontrados apenas dados mensais disponíveis de precipitação e evapotranspiração de referência. Como estes valores mudam de um mês para o outro e os valores de  $K_C$  variam de acordo com os estádios da cultura, o número de períodos com diferentes demandas, é superior ao número de meses e de estádios da cultura, como está exemplificado na Figura 3.2.

O maior valor de demanda encontrado, entre os diferentes períodos, deve ser utilizado para o planejamento da irrigação.

É necessário observar que, ao trabalhar com séries históricas, para um mesmo período considerado (mês de janeiro, por exemplo), são encontrados diferentes valores de demanda, para cada ano da série considerada. Deve-se evitar utilizar o valor médio, pois resulta em um projeto que apresenta 50% de probabilidade de falha no atendimento integral das necessidades da cultura. Por outro lado, a escolha do maior valor encontrado na série histórica resulta no dimensionamento de um sistema que com baixa probabilidade de ser plenamente

utilizado, ficando com capacidade ociosa na maior parte do tempo. Por esta razão, busca-se estimar um valor de demanda que tenha entre 70 e 80% de probabilidade de ocorrência. Maiores valores de probabilidade, são recomendáveis, por exemplo, para culturas de grande valor econômico ou muito sensíveis aos déficits hídricos.

<b>Precipitação (PE)</b>	Mês 1		Mês 2		Mês 3		Mês 4	
<b>Evapotranspiração (E<sub>t0</sub>)</b>	Mês 1		Mês 2		Mês 3		Mês 4	
<b>Estágios (k<sub>c</sub>)</b>		I	II	III		IV		
<b>Demanda</b>		1	2	3	4	5	6	7

Figura 3.2 – Ilustração da obtenção das diferentes fases de demanda de irrigação, em função da variação mensal das variáveis climatológicas e dos diferentes estágios da cultura.

Uma forma simples de determinar a probabilidade de ocorrência associada a cada valor de demanda (D<sub>x</sub>), em um dado período, em uma série com n anos de dados, pode ser expressa pela relação:

$$P_{(D_x)} = \frac{m_{D_x}}{na + 1} \cdot 100 \quad (3.2)$$

em que: P<sub>(D<sub>x</sub>)</sub> = probabilidade de ocorrência de demanda igual ou inferior a D<sub>x</sub>, no período considerado, em %;

m<sub>D<sub>x</sub></sub> = número de anos em que ocorreram valores de demanda igual ou inferior a D<sub>x</sub>, no período considerado;

na = número de anos da série histórica.

### 3.5 Freqüência de irrigação

A freqüência de irrigação (F), ou intervalo de irrigação, representa o espaço de tempo, em dias, entre duas irrigações sucessivas. A freqüência é estabelecida de forma a garantir o suprimento de água para as plantas de acordo com suas necessidades, nos diferentes estádios de desenvolvimento, evitando que a umidade do solo alcance valores excessivamente baixos.

A freqüência de irrigação pode ser representada pela seguinte equação:

$$F = \frac{L_L}{D} \quad (3.3)$$

em que:  $F$  = freqüência ou intervalo entre irrigações, em dias;

$L_L$  = lâmina líquida, em mm;

$D$  = lâmina correspondente à demanda diária de água, em  $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ .

No caso de irrigação total, quando as precipitações não são contabilizadas, a freqüência pode ser determinada por:

$$F = \frac{L_L}{ET_C} \quad (3.4)$$

em que:  $ET_C$  = evapotranspiração diária da cultura, em  $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ;

No caso de irrigação suplementar, quando as precipitações são relevantes na determinação da demanda, a freqüência pode ser determinada por:

$$F = \frac{L_L}{D} = \frac{L_L}{ET_C - PE} \quad (3.5)$$

em que:  $PE$  = precipitação efetiva diária, em  $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ .

A freqüência de irrigação e seu efeito sobre a umidade do solo, pode ser representada graficamente, como mostra a Figura 3.3.

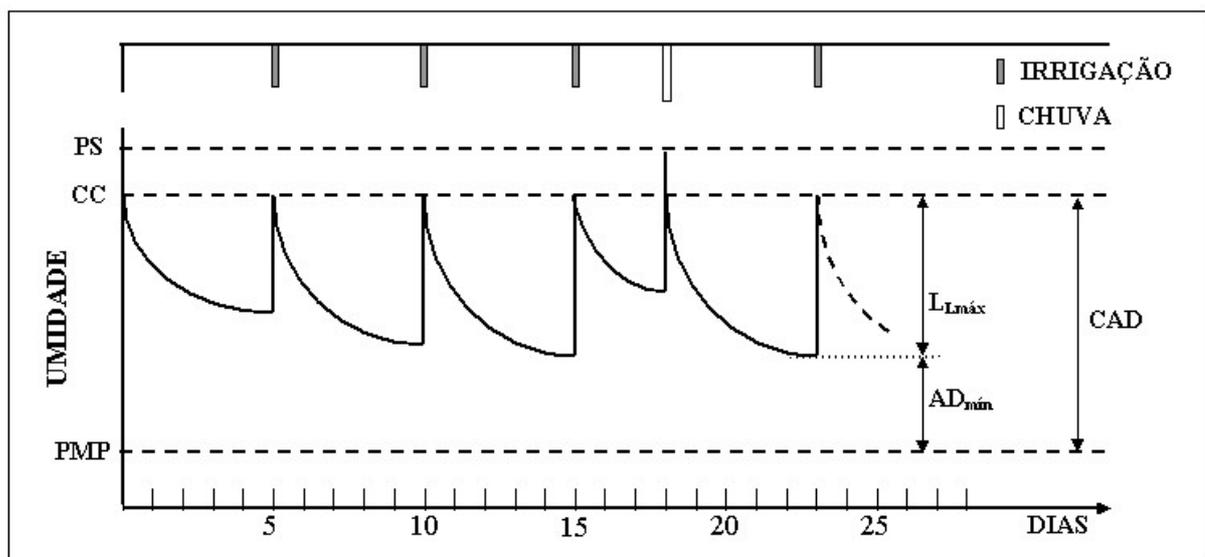


Figura 3.3 – Esquema de depleção da água no solo e a freqüência de irrigação.

### 3.5.1 Lâmina líquida corrigida

Em geral, o cálculo da frequência resulta em um número não exato, o qual deve ser arredondado, para mais ou para menos, de forma a obter o valor efetivamente utilizado como frequência. Este arredondamento (ou correção) irá causar uma variação no valor da demanda total entre duas irrigações consecutivas.

Dessa forma, para evitar a colocação excessiva ou deficiente de água no solo, deve ser realizado um ajuste no valor da lâmina líquida a ser aplicada. O valor ajustado da lâmina de irrigação é denominado lâmina líquida corrigida, podendo ser expressa como:

$$L_{Lc} = F_a \cdot D \quad (3.6)$$

em que:  $L_{Lc}$  = lâmina líquida corrigida, em mm;

$F_a$  = frequência de irrigação ajustada, em dias;

$D$  = demanda de água, em  $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ .

Da mesma forma, é necessário ajustar o valor da lâmina bruta, na forma:

$$L_{Bc} = \frac{L_{Lc}}{E_a} \quad (3.7)$$

em que:  $L_{Bc}$  = lâmina bruta corrigida, em mm;

$L_{Lc}$  = lâmina líquida corrigida, em mm;

$E_a$  = eficiência de aplicação, em decimal.

### 3.5.2 Tempo de irrigação

Tempo de irrigação é o tempo necessário para que, após iniciada a irrigação de uma parcela ou talhão, toda a parcela receba a quantidade de água necessária para que o solo atinja o nível de umidade desejado.

O cálculo do tempo de irrigação varia de acordo com o método de irrigação utilizado. De maneira genérica, o tempo de irrigação depende do volume de água que deve ser aplicado durante a irrigação e da vazão fornecida pelo sistema de irrigação. Esta relação genérica pode ser expressa da seguinte forma:

$$T_i = \frac{\text{Vol}}{Q} \quad (3.8)$$

em que:  $T_i$  = tempo de irrigação, em horas;

$Vol$  = volume a ser aplicado, em  $m^3$ ;

$Q$  = vazão do sistema de irrigação, em  $m^3 \cdot h^{-1}$ .

O volume de água que deve ser aplicado depende da lâmina bruta, calculada para atender a demanda, e da área sobre a qual esta lâmina deve ser distribuída (Figura 3.4), podendo ser expresso como:

$$Vol = 10 \cdot L_B \cdot A \quad (3.9)$$

em que:  $Vol$  = volume a ser aplicado, em  $m^3$ ;

$L_B$  = lâmina bruta, em mm;

$A$  = área irrigada, em ha.

É preciso salientar que este cálculo genérico é válido apenas para os casos em que a irrigação molhe toda a superfície da parcela irrigada, o que não ocorre nos métodos de irrigação localizada. Na irrigação localizada, o volume de água, que deve ser aplicado por cada emissor, pode ser calculado multiplicando a lâmina bruta pela área molhada pelo emissor.

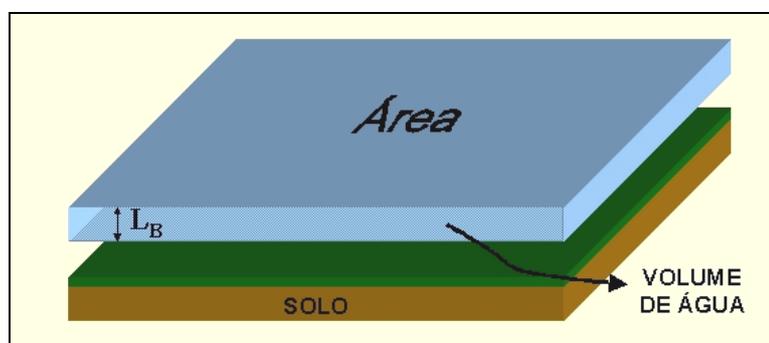


Figura 3.4 – Representação do volume de água aplicado na irrigação.

### 3.5.3 Período de irrigação

Após estabelecida a frequência de irrigação, deverá ser definido o período de irrigação, que corresponde ao número de dias que serão utilizados para completar a irrigação em toda a área irrigada. O período de irrigação pode ser, no máximo, igual à frequência de irrigação, mas normalmente se estabelece um dia a menos que a frequência, ou seja:

$$P = F - 1 \quad (3.10)$$

em que:  $P$  = período de irrigação, em dias.

Este procedimento é adotado como uma medida preventiva, pois caso o sistema de irrigação necessite ser desativado para execução de reparos e manutenção, esse dia, previsto como sem irrigação, servirá para compensar as eventuais paradas. Por outro lado, também servirá para o irrigante ter um dia de folga nas atividades de irrigação e fazer ajustes relacionados ao uso de mão-de-obra.

### 3.6 Tipos de manejo e informações necessárias

O manejo da irrigação consiste na definição dos métodos que serão utilizados para responder as duas questões centrais da irrigação:

- a) quando irrigar?
- b) qual a quantidade de água a ser utilizada?

Existem diferentes formas de monitoramento da necessidade de irrigação na lavoura. Podemos citar dois dos principais métodos utilizados:

- a) método baseado em balanço hídrico;
- b) método baseado em indicadores da umidade do solo.

#### 3.6.1 Manejo baseado em balanço hídrico

Isoladamente, as variáveis climatológicas são de pouca utilidade para a determinação das condições de umidade do solo. Para acompanhar o comportamento do teor de água do solo, é necessário avaliar, de forma conjunta, o efeito de cada uma das variáveis e suas interações (Figura 3.5). Isto pode ser conseguido, em uma base diária, pela realização de um balanço hídrico do conteúdo de água no solo. Neste balanço, são computadas as diversas formas de entrada e saída de água do solo, tomando por base a camada do solo delimitada pela profundidade efetiva. Este balanço pode ser descrito pela seguinte equação:

$$AD_i = AD_{i-1} + PE - ET_C \quad (3.11)$$

em que:  $AD_i$  = lâmina de água armazenada no solo no dia  $i$ , em mm;

$AD_{i-1}$  = lâmina de água armazenada no solo no dia anterior, em mm;

$PE$  = precipitação efetiva, em mm;

$ET_C$  = evapotranspiração da cultura, em mm.

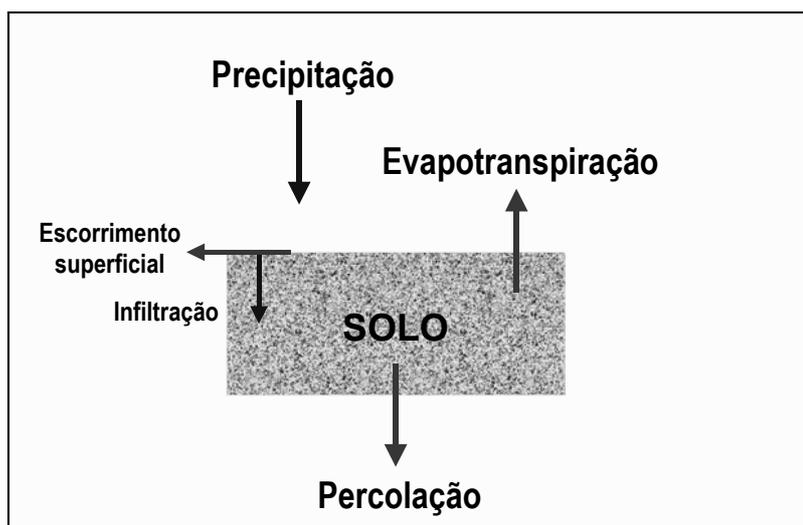


Figura 3.5 – Representação esquemática dos fluxos do balanço hídrico.

A lâmina de água armazenada no solo está relacionada com a umidade do solo, na forma:

$$AD_i = \theta_i \cdot Z_e \quad (3.12)$$

em que:  $\theta_i$  = umidade do solo no dia  $i$ , em  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ;

$Z_e$  = profundidade efetiva do sistema radicular, em mm.

Na grande maioria dos balanços hídricos, a lâmina de água disponível no solo fica limitada entre zero e 100% da capacidade de água disponível no solo, ou seja:

$$0 \leq AD_i \leq CAD \quad (3.13)$$

Para os períodos em que o valor de  $[AD_{i-1} + PE - ET_C]$  exceda a capacidade de água disponível, o valor excedente é considerado como sendo composto por escoamento superficial e percolação e  $[AD_i = CAD]$ , uma vez que a água disponível não pode ultrapassar a CAD.

Por outro lado, para períodos em que o valor de  $[AD_{i-1} + PE - ET_C]$  resulte negativo, é considerado que  $[AD_i = 0]$ , uma vez que não podem ocorrer valores negativos de água disponível.

Na Tabela 3.1 é apresentado um exemplo simplificado de balanço hídrico, para um solo com 50 mm de capacidade de armazenamento de água.

A Figura 3.6 ilustra um exemplo de planilha de cálculo de balanço hídrico, para determinação da demanda e respectivos tempos de irrigação, por gotejamento, em um sistema de manejo com datas fixas de irrigação.

Tabela 3.1 – Exemplo de balanço hídrico, para um solo com 50 mm de capacidade de armazenamento de água.

Dia	AD (mm)	PE (mm)	ET <sub>c</sub> (mm)	AD + PE - ET <sub>c</sub> (mm)
1	50	0	8	42
2	42	0	8	34
3	34	0	7	27
4	27	0	8	19
5	19	0	7	12
6	12	0	8	4
7	4	0	7	-3
8	0	0	6	-6
9	0	17	3	14
10	14	24	2	36
11	36	18	2	52
12	50	7	4	53
13	50	0	5	45
14	45	...	...	...

Dia	Eto	Kc	Etc	P	Demanda	Qi Gotej. l/h	área(dm <sup>2</sup> )	Taxa (mm/h)	Situação	Tempo Irrig
1	7,57	1	<b>7,57</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
2	8,50	1	<b>8,5</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
3	6,24	1	<b>6,24</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
4	6,90	1	<b>6,9</b>	0,00	29,38	2,10	45,00	4,67	Irrigar	7,24
5	7,59	1	<b>7,59</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
6	7,53	1	<b>7,53</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
7	8,54	1	<b>8,54</b>	0,00	22,03	2,10	45,00	4,67	Irrigar	5,33
8	8,17	1	<b>8,17</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
9	7,12	1	<b>7,12</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
10	8,45	1	<b>8,45</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
11	8,70	1	<b>8,7</b>	0,00	32,29	2,10	45,00	4,67	Irrigar	8,08
12	7,58	1	<b>7,58</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
13	3,14	1	<b>3,14</b>	0,40		2,10	45,00	4,67		0,00
14	7,05	1	<b>7,05</b>	20,00	19,02	2,10	45,00	4,67	Irrigar	4,48
15	7,57	1	<b>7,57</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
16	6,03	1	<b>6,03</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
17	5,59	1	<b>5,59</b>	33,00		2,10	45,00	4,67		0,00
18	3,95	1	<b>3,95</b>	0,00	0,00	2,10	45,00	4,67	Não Irrigar	0,00
19	4,74	1	<b>4,74</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
20	4,50	1	<b>4,5</b>	6,60		2,10	45,00	4,67		0,00
21	7,37	1	<b>7,37</b>	0,00	6,59	2,10	45,00	4,67	Irrigar	1,40
22	9,20	1	<b>9,2</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00
23	8,80	1	<b>8,8</b>	44,00		2,10	45,00	4,67		0,00
24	4,62	1	<b>4,62</b>	8,10		2,10	45,00	4,67		0,00
25	2,99	1	<b>2,99</b>	23,00	0,00	2,10	45,00	4,67	Não Irrigar	0,00
26	9,22	1	<b>9,22</b>	0,00		2,10	45,00	4,67		0,00

Figura 3.6 – Exemplo de planilha de balanço hídrico, com cálculo dos tempos de irrigação.

### 3.6.2 Manejo baseado na umidade do solo

Nesta modalidade de manejo a umidade do solo precisa ser monitorada a fim de que sejam obtidos os valores de demanda de irrigação, em função da umidade. Como já foi visto, a água disponível pode ser determinada, em função da umidade, pela expressão:

$$AD_i = \theta_i \cdot Z_e \quad (3.14)$$

Neste caso, a demanda por irrigação no dia  $i$  pode ser expressa por:

$$D_i = CAD - AD_i \quad (3.15)$$

em que:  $D_i$  = demanda por irrigação no dia  $i$ , em mm;

CAD = capacidade de água disponível, em mm.

#### 3.6.2.1 Monitoramento do teor de umidade do solo

Pode-se monitorar o comportamento do conteúdo de água do solo, tanto para tomada de decisões em nível operacional (curto prazo), como para tomada de decisões em nível de planejamento (longo prazo). No primeiro caso, o valor da umidade do solo é diretamente utilizado para estimar as necessidades de irrigação a curto prazo, enquanto que no segundo caso, as variações do conteúdo de umidade do solo, podem ser utilizadas para aferir e calibrar o modelo de balanço hídrico adotado.

A determinação da umidade do solo, pode ser feita a partir de métodos que envolvam a coleta de amostras do solo, como o método gravimétrico direto, o método das pesagens ou o método do acetileno. Também é possível estimar a umidade do solo por métodos indiretos que não necessitem coleta de amostras, como os blocos de resistência elétrica, os tensiômetros, a sonda de nêutrons e as sondas do tipo TDR.

O método gravimétrico direto baseia-se na comparação do peso da amostra úmida, com o peso da amostra seca em estufa. Por ser um método trabalhoso e demorado, não é indicado para o monitoramento do teor de umidade do solo, em uma escala operacional, envolvendo medições diárias. Entretanto, pela sua precisão, pode ser de grande utilidade para a realização de medições esporádicas, para a calibração de outros métodos e aferição de modelos de balanço hídrico.

O método das pesagens envolve a obtenção de um conjunto padrão de solo e água, de volume pré-determinado, formado por uma amostra seca do solo e completado com água. A densidade das partículas e o peso de outros conjuntos, formados por amostras úmidas do solo e completados com água, servirão de base para a determinação do teor de umidade das amostras úmidas. Após a obtenção do conjunto padrão, a aplicação do método se torna relativamente simples, mas ainda envolve a coleta e pesagem de amostras.

O princípio básico do método do acetileno, é a medição da pressão gerada pela produção de gás acetileno, em um recipiente fechado, resultante da reação química que ocorre entre a água contida em uma amostra de solo e uma certa quantidade de carbureto de cálcio a ela adicionada. Apesar de simples e rápido, o método é pouco preciso e, no caso de aparelhos de fabricação caseira, necessita um trabalho de calibração.

Um dos métodos de estimativa do teor de umidade do solo, que não exige a coleta de amostras de solo, é o método da moderação de nêutrons, conhecido também como método da sonda de nêutrons. Consiste em utilizar um equipamento que emite nêutrons rápidos, os quais, em contato com a água do solo são moderados e refletidos como nêutros lentos, sendo detectados por um contador de nêutrons lentos. Quanto maior o teor de umidade do solo, maior a quantidade de nêutrons moderados, refletidos e detectados pelo aparelho. Após ser devidamente calibrado, o método é rápido e tem alta precisão, possibilitando o monitoramento de diversos pontos em um curto intervalo de tempo. Entretanto, o custo é elevado e seu uso pode ser perigoso, se não for devidamente manuseado, uma vez que envolve a utilização de material radioativo. Outra desvantagem do método, é a possibilidade da presença no solo de outras substâncias moderadoras de nêutrons, que podem mascarar os resultados obtidos.

Outra alternativa para o monitoramento do teor de umidade do solo, é a utilização de blocos de resistência elétrica. São blocos constituídos por um material permeável à água (em geral gesso), que em seu interior possuem dois eletrodos separados por este material. A condutividade elétrica, entre os dois eletrodos, no interior do bloco, é medida por um condutímetro (omímetro). Quanto maior o teor de umidade no solo, maior a condutividade elétrica. A sensibilidade destes aparelhos

é pequena para medições feitas quando o potencial de água no solo está entre zero e -1,0 bar (-100 kPa).

Os tensiômetros são instrumentos que medem diretamente a tensão da água no solo, em condições de campo. São constituídos por um tubo de PVC rígido ou acrílico, que possuem em uma extremidade uma cápsula permeável e na outra extremidade um manômetro para pressões negativas (vacuômetro do tipo Bourdon ou manômetro de mercúrio). O tubo é preenchido com água e a extremidade que possui a cápsula permeável é inserida no solo, na profundidade que se deseja fazer a medição. Através da cápsula permeável, se estabelece um equilíbrio entre a tensão da água no solo e a pressão no interior do aparelho. O valor da tensão pode então ser lido diretamente no manômetro (Figura 3.7). Para obter os valores de umidade do solo, correspondentes aos valores de tensão fornecidos pelo tensiômetro, é necessário conhecer a curva característica do solo monitorado.



Figura 3.7 – Instalação de tensiômetros e monitoramento da tensão da água no solo.

Atualmente está havendo um aumento no uso de sistemas de monitoramento da umidade do solo, que se utilizam da geração de campos elétricos de alta frequência, sensores de capacitância fixos no solo e sondas portáteis, que permitem, em poucos segundos, coletar e armazenar dados de estimativas da umidade do solo em várias profundidades, em um mesmo local, e em intervalos de tempo muito curtos.

### **3.6.3 Manejo com lâmina de irrigação fixa**

Nesta modalidade de manejo é estabelecida uma lâmina fixa de irrigação. Neste caso a quantidade de água a ser colocada será a mesma em todas as irrigações, mas o intervalo de tempo entre as irrigações será variável, em função da demanda.

Se o manejo estiver sendo baseado em balanço hídrico, o momento da irrigação será aquele em que a demanda acumulada igualar o valor da lâmina líquida de irrigação.

Se o manejo estiver sendo baseado em monitoramento da umidade do solo, o momento da irrigação será aquele em que a umidade do solo atinja a umidade de irrigação ou a tensão da água no solo atinja a tensão crítica para a cultura.

### **3.6.4 Manejo com frequência de irrigação fixa**

Nesta modalidade de manejo são fixados os intervalos de tempo entre as irrigações. Sendo assim as datas de irrigação serão preestabelecidas, mas a quantidade de água a ser aplicada irá variar de uma irrigação para outra, em função da demanda no período entre duas irrigações.

Neste caso, se o manejo estiver sendo baseado em balanço hídrico, a quantidade de água a ser colocada (lâmina líquida) será determinada pela demanda acumulada no período.

Caso o manejo seja baseado em monitoramento da umidade do solo, a lâmina líquida será determinada pela diferença entre a capacidade de água disponível e o total de água disponível no dia da irrigação, que é obtido a partir do valor da umidade do solo.

## **3.7 Eficiência de irrigação**

De forma geral, a eficiência de irrigação diz respeito à relação entre a quantidade de água necessária para atender à demanda das plantas e a quantidade efetivamente utilizada. Na Tabela 3.2 são apresentados alguns valores médios de diferentes sistemas de irrigação, em função de fatores condicionantes. Os valores apresentados servem como um referencial, pois a eficiência real, de um dado sistema de irrigação, apenas pode ser conhecida através de medições a campo.

Tabela 3.2 – Eficiência média de irrigação em função do método de irrigação e de condicionantes (ENGEORPS, 1998).

<b>Método</b>	<b>Condicionante</b>	<b>Eficiência* (%)</b>
Sulcos de infiltração	Sulcos longos e/ou solos arenosos	50
	Solo e comprimento de sulco adequados	65
Inundação (tabuleiros)	Solo arenoso - lençol profundo	40
	Solo argiloso - lençol raso	60
Aspersão convencional	Ventos fortes	60
	Ventos leves ou ausentes	75
Autopropelido / montagem direta	Ventos fortes	60
	Ventos leves ou ausentes	75
Pivô central	Vento forte / condições razoáveis	75
	Em ótimas condições	90
Microaspersão	Condições razoáveis	75
	Em ótimas condições	90
Gotejamento	Condições razoáveis	85
	Em ótimas condições	95
Tubos perfurados	Perfuração manual	65
	Em ótimas condições	80

\* Não estão consideradas as perdas de água em canais e nas estações de bombeamento.

A eficiência pode ser abordada sob diferentes aspectos, sendo os mais comuns os seguintes:

### 3.7.1 Eficiência de aplicação

Nem toda água distribuída sobre a área irrigada, pelo sistema de irrigação, fica efetivamente à disposição das plantas. Uma parcela do volume aplicado não fica armazenada na camada de solo delimitada pela profundidade efetiva. Esta parcela é formada pelas perdas de água que ocorrem na área irrigada. Estas perdas podem apresentar grandes variações, de acordo com o sistema de irrigação utilizado, condições climáticas no momento da irrigação, adequação do projeto, operação do sistema, entre outros fatores. As formas mais comuns de perdas durante a aplicação de água são:

- a) perdas por evaporação: ocorrem quando parte da água aplicada durante a irrigação evapora antes de infiltrar no solo;
- b) perdas por escoamento superficial: ocorrem quando parte da água aplicada escorre sobre a superfície do solo, ao invés de infiltrar;

- c) perdas por percolação: surgem quando ocorre aplicação excessiva de água, elevando a umidade do solo acima da capacidade de campo. O excesso de água é drenado por ação da gravidade, saindo da camada explorada pelo sistema radicular das plantas.

A eficiência de aplicação pode ser expressa como a razão entre o volume de água que fica efetivamente armazenado no solo, à disposição das plantas e o volume total aplicado durante a irrigação, como segue:

$$E_a = \frac{\text{Vol}_D}{\text{Vol}_A} \times 100 \quad (3.16)$$

em que:  $E_a$  = eficiência de aplicação, em %;

$\text{Vol}_D$  = volume disponibilizado para as plantas, em  $\text{m}^3$ ;

$\text{Vol}_A$  = volume aplicado pelo sistema de irrigação, em  $\text{m}^3$ .

Considerando que o volume de água que deve ser disponibilizado para as plantas é representado pela lâmina líquida de irrigação e que o volume total aplicado é representado pela lâmina bruta, então a eficiência de aplicação pode ser calculada de acordo com a equação a seguir:

$$E_a = \frac{L_L}{L_B} \times 100 \quad (3.17)$$

Quando são utilizados métodos de irrigação por gravidade, como inundação, faixas ou sulcos, a eficiência de aplicação pode variar desde valores inferiores a 45% até valores em torno de 70%. Para os métodos de irrigação por aspersão, estes valores ficam em torno de 65 a 85%, enquanto que para os métodos de irrigação localizada, como gotejamento e microaspersão, pode variar de 80 a 95%.

### 3.7.2 Eficiência de condução

Parte da água que é retirada da fonte de suprimento pode ser perdida durante sua condução até a parcela irrigada. As perdas que ocorrem na condução da água dependem de vários fatores, como a distância da fonte de suprimento até o local da irrigação, tipo de condução utilizada (canais ou tubulações) e estado de conservação dos condutos, por exemplo.

Quando a água é conduzida através de tubulações, as perdas podem variar desde 1% em sistemas bem conservados e corretamente operados, até 10% ou mais em sistemas mal conservados ou incorretamente operados (GOMES, 1997).

Quando a água é conduzida através de canais, ocorrem grandes variações nas perdas de condução, em função de fatores como a utilização ou não de revestimento impermeável nas paredes dos canais, nível de evaporação da superfície, existência ou não de cobertura sobre o canal e características do solo em canais não revestidos.

A eficiência de condução pode ser expressa na forma:

$$E_c = \frac{\text{Vol}_A}{\text{Vol}_R} \times 100 \quad (3.18)$$

em que:  $E_c$  = eficiência de condução, em %;

$\text{Vol}_A$  = volume aplicado pelo sistema de irrigação, em  $\text{m}^3$ ;

$\text{Vol}_R$  = volume retirado da fonte de suprimento, em  $\text{m}^3$ .

### 3.7.3 Eficiência total

A eficiência total engloba as eficiências de condução e aplicação e pode ser expressa como a razão entre o volume de água que fica efetivamente armazenado no solo, à disposição das plantas e o volume retirado da fonte de suprimento, como segue:

$$E_T = \frac{\text{Vol}_D}{\text{Vol}_R} \times 100 \quad (3.19)$$

em que:  $E_T$  = eficiência total, em %.

A eficiência total também pode ser expressa como:

$$E_T = E_a \cdot E_c \cdot 100 \quad (3.20)$$

em que:  $E_T$  = eficiência total, em %;

$E_a$  = eficiência de aplicação, em decimal;

$E_c$  = eficiência de condução, em decimal.

### 3.7.4 Eficiência de distribuição

Durante a irrigação, alguns locais recebem uma maior quantidade de água, ao passo que outros locais irão receber quantidades menores. A eficiência de distribuição se refere à uniformidade com que a água é distribuída na área irrigada. Considerando que o objetivo da irrigação seja distribuir uma lâmina de água média igual à lâmina líquida determinada no projeto, os locais que receberem maiores quantidades de água estarão recebendo lâminas superiores à lâmina líquida, o que causaria um excesso de umidade no solo, podendo ocasionar perdas de produtividade por encharcamento. Por outro lado, os locais que receberem menores quantidades de água estarão recebendo lâminas inferiores à lâmina líquida, podendo ocasionar perdas de produtividade por déficit hídrico.

Em áreas de cultivo para produção de sementes a eficiência de distribuição é fundamental, pois tem relação direta com a uniformidade de maturação das sementes.

A eficiência de distribuição é um bom indicador da qualidade da irrigação que está sendo realizada e a forma de medir esta eficiência varia de acordo com o método de irrigação utilizado.

No caso da irrigação por gotejamento, por exemplo, uma forma de avaliar a eficiência de distribuição é através da verificação da uniformidade de vazão entre os gotejadores. As diferenças de vazão entre gotejadores, que estejam funcionando simultaneamente em uma parcela irrigada, pode ser causada por diversos fatores, como diferenças de cotas, entupimentos, vazamentos, problemas de fabricação e comprimento excessivo das linhas de gotejamento. Para medir a vazão de um gotejador, basta coletar e medir o volume de a água que o mesmo libera em um certo intervalo de tempo (Figura 3.8). A vazão do gotejador é o quociente entre o volume coletado e o tempo de coleta, como segue:

$$q = 0,06 \cdot \frac{\text{vol}_c}{t_c} \quad (3.21)$$

em que:  $q$  = vazão do gotejador, em  $L \cdot h^{-1}$ ;

$\text{vol}_c$  = volume coletado, em ml;

$t_c$  = tempo de coleta, em min.



Figura 3.8 – Teste de vazão em gotejador.

Se, por exemplo, em um dado gotejador forem coletados 207 mililitros de água, em um intervalo de 5 minutos, a vazão resultante seria:

$$q = 0,06 \cdot \frac{207}{5} = 2,48 \text{ L/h} \quad (3.22)$$

A eficiência com que a água está sendo distribuída na área irrigada também pode ser avaliada sob outros aspectos. No gotejamento, por exemplo, a adequação dos emissores pode ser avaliada, em termos da relação entre a área molhada e a área da planta. Se a área umedecida pelos emissores for muito pequena, em relação a área explorada pelo sistema radicular da planta, a irrigação pode ter sua eficiência comprometida.

Outro tipo de avaliação que pode ser realizada na irrigação localizada é quanto à distribuição da água no perfil do solo. Isto pode ser feito através do teste de bulbo úmido, que consiste na abertura de trincheiras logo abaixo dos gotejadores, após certos intervalos de tempo, para verificar o formato do bulbo úmido, que caracteriza a forma como a água está se distribuindo no perfil do solo. Na Figura 3.9 pode ser vista a diferença entre os formatos dos bulbos úmidos em dois solos diferentes, submetidos à irrigação por gotejamento, com o mesmo tipo de gotejador, mesma vazão e mesmo tempo de irrigação.



Figura 3.9 – Formação de bulbo úmido, por gotejamento, em dois diferentes tipos de solo.

A uniformidade da distribuição de água também pode ser avaliada, através do uso de tensiômetros, dispostos em diferentes locais da área irrigada. Desta forma, é possível verificar se a tensão da água no solo, que está relacionada com a umidade, apresenta uniformidade ao longo da área irrigada.

### 3.7.5 Eficiência de uso da água de irrigação

A eficiência de uso da água de irrigação é uma forma mais global de avaliar o uso da irrigação, não se restringindo apenas aos aspectos de manejo do sistema, mas considerando também as questões relativas ao retorno econômico do uso da irrigação, à preservação ambiental e ao uso racional da água.

Em termos econômicos, a eficiência do uso da água pode ser avaliada pelo quociente entre o aumento de renda líquida gerado pelo uso da irrigação e o volume de água utilizado.

Em relação à produção, a eficiência do uso da água de irrigação, pode ser avaliada através da relação entre o aumento da produção em peso ou da qualidade do produto e o volume de água consumido.

Na área de produção de sementes, a eficiência do uso da água de irrigação deve levar em consideração a diferença entre a produção e a qualidade das sementes produzidas na área irrigada e nas áreas não irrigadas, em relação ao volume de água consumido.

A avaliação da irrigação, em termos ambientais, pode ser feita através da comparação dos impactos ambientais entre as diferentes alternativas de projeto, em termos de método de irrigação a ser adotado e manejo da água. Entre as alternativas analisadas, deve ser incluída a alternativa de produção não irrigada.

### **3.8 Outros aspectos relacionados ao manejo**

#### **3.8.1 Suprimento insuficiente de água**

Em anos de ocorrência de estiagens mais severas, o fato do produtor possuir um sistema de irrigação e um reservatório de água, podem não ser condições suficientes para garantir que não ocorrerão quebras na produção. Não é raro, nestas ocasiões, que o volume de água no reservatório seja insuficiente para atender o consumo durante todo o período de irrigação. Em períodos muito secos, existe uma tendência a usar o sistema de irrigação de forma mais intensiva, sem o conhecimento adequado sobre os efeitos da deficiência de água nos diferentes estádios de desenvolvimento da planta.

Em situações de estiagens mais intensas ou em regiões onde as precipitações são escassas durante o ciclo da cultura e as reservas de água são limitadas, recomenda-se que o manejo da irrigação seja feito com restrição de água em algumas fases da cultura, visando economia de água. Nestes casos, uma forma de manejar a água disponível para a cultura é manter o nível de umidade do solo entre 50 e 75% da capacidade de água disponível durante as fases em que a cultura é mais tolerante ao déficit hídrico, e acima de 75% da CAD durante as fases de menor tolerância ao déficit.

Uma questão crucial para a irrigação é o conhecimento da capacidade de suprimento das fontes de água disponíveis, bem como a estruturação de estratégias de utilização desta água, ou fontes alternativas, em situações de ocorrência de eventos extremos.

#### **3.8.2 Questões fitossanitárias**

Ao definir o manejo da irrigação, deve ser considerada a possibilidade de surgimento de alguns efeitos negativos. Um exemplo é a criação de um microclima mais propício ao surgimento de doenças, especialmente aquelas resultantes da

ação de fungos. A associação entre as temperaturas mais altas, em dias mais quentes, com a maior umidade propiciada pela irrigação, gera um ambiente favorável ao desenvolvimento de microorganismos.

O acompanhamento das previsões sobre as condições climáticas deve ser uma rotina diária na programação da irrigação. Estando ciente da previsão de ocorrência de frentes frias ou condições chuvosas, o planejador pode tomar medidas preventivas, relacionadas ao uso da fertirrigação e à redução das lâminas de água aplicadas ou ao aumento do intervalo entre irrigações.

Também deve ser levado em consideração que os diferentes métodos de irrigação apresentam características de molhamento distintas. Enquanto alguns métodos molham apenas uma reduzida parcela do solo, como no caso do gotejamento, outros molham todo o solo e toda a planta, como no caso da aspersão. Além disso, a própria água de irrigação pode servir de meio de disseminação de patógenos, seja pela contaminação da água, seja pelo transporte na lavoura. Estruturas de propagação de fungos, por exemplo, podem ser transportadas por longas distâncias, através dos respingos de água nas folhas, na irrigação por aspersão, ou sobre a superfície do solo, arrastados pela água, na irrigação por sulcos.

Na cultura da batata, por exemplo, a ocorrência de doenças fúngicas e bacterianas nos cultivos sob irrigação localizada, tende a ser menor do que nos cultivos sob irrigação por aspersão (SILVA et. al., 2005).

Em um estudo comparativo entre produção de sementes de feijão sob irrigação por aspersão e por sulcos, no qual foram otimizados os aspectos de nutrição, e controles de pragas e de plantas daninhas, porém sem qualquer aplicação de fungicidas, foi constatado que o sistema de aspersão favoreceu a ocorrência de patógenos nas sementes, com conseqüente redução na germinação e no vigor (VIEIRA-JUNIOR et. al., 1998).

Foram realizados alguns trabalhos nas várzeas tropicais do Estado do Tocantins, durante a entressafra do arroz, cultivando feijão utilizando o método de subirrigação (ou drenagem controlada), o qual consiste no manejo da superfície freática. Este método de irrigação tem apresentado melhores resultados em relação à disseminação e ao desenvolvimento de doenças da parte aérea, comparado com a irrigação por aspersão. Em relação ao sistema de sulcos, apresenta a vantagem de

não ocasionar o transporte de estruturas de resistência de fungos de um local para outro (RAVA; VIEIRA; MOREIRA, 2005).

### **3.8.3 Solos rasos**

Um outro efeito adverso da irrigação pode surgir em regiões onde os solos são rasos, pela existência de uma camada de baixa permeabilidade, a pouca profundidade, apresentando deficiência de drenagem. Nesta situação, por apresentar pequena capacidade de armazenamento de água, o solo pode passar rapidamente de uma condição de déficit hídrico para uma condição de saturação (encharcamento). Nestes solos, como a irrigação evita que a umidade atinja valores muito baixos, pode aumentar a ocorrência e a duração dos períodos de encharcamento causados pelas chuvas. O encharcamento do solo, além de aumentar a incidência de problemas fitossanitários, também causa a redução da aeração do solo, provocando perdas de produtividade, que irão variar de acordo com a tolerância da cultura ao encharcamento. O trânsito de máquinas e as operações de campo também são prejudicadas pelo encharcamento. Sendo assim, o manejo da irrigação em locais com estas características, deve ser realizado em conjunto com um atento acompanhamento das previsões climáticas.

### **3.8.4 Interação com outras práticas**

No planejamento e manejo da irrigação também deve ser considerada a relação da irrigação com outras práticas, como a aplicação de fertilizantes e defensivos. Outra alternativa é a aplicação dos produtos junto com a água de irrigação.

A aplicação de fungicida via água de irrigação, em sistemas de aspersão, já foi testada com bons resultados, para diversas combinações de patógeno/hospedeiro (PINTO; COSTA, 1999).

Na produção de sementes de cenoura, é recomendado irrigar levemente a cultura, logo após a aplicação de adubação em cobertura, para evitar que ocorra queima das folhas, devido ao contato direto com o adubo químico (NASCIMENTO; VIEIRA; MAROUELLI, 2005).

### 3.8.5 Manejo específico

Outro fator que deve ser considerado no estabelecimento da programação da irrigação, é o conhecimento da resposta da planta a diferentes estratégias de manejo da irrigação, em termos de produção e qualidade de sementes. Nem sempre a melhor estratégia de manejo da irrigação, para a obtenção de altos rendimentos e qualidade de sementes coincide com o manejo ideal para um cultivo não dirigido à produção de sementes. Para cebola, por exemplo, altos rendimentos e alta qualidade de sementes são alcançados quando a irrigação inicia logo após o plantio das mudas e é interrompida no início da fase leitosa das sementes (GLOBERSON et al., 1987), resultando em economia de água e mão-de-obra.

Em um estudo comparativo entre sete diferentes regimes de manejo da irrigação do feijoeiro, foi constatado que em um dos regimes, com ocorrência de déficit hídrico durante a fase vegetativa, nem a eficiência de uso de água, nem a produção de sementes, foram afetadas, permitindo uma economia de água de 30% (CALVACHE et. al., 1997).

Por outro lado em um estudo comparativo entre três regimes de manejo para o milho, foi verificado que a ocorrência de déficit hídrico no período vegetativo não afetou a qualidade fisiológica das sementes produzidas, mas foi o mais prejudicial à produção da cultura (GALBIATTI et. al., 2004).

Comparando o desenvolvimento e produção de uma aveia forrageira de inverno (variedade São Carlos), cultivada sob condições de irrigação por aspersão, Bacchi et. al. (1996), não encontraram diferença na produção de sementes ou no peso de mil sementes, entre uma condição em que a disponibilidade hídrica média foi de 85% da CAD, com mínimos de 66% da CAD, correspondentes a valores de -20 kPa de potencial mátrico a 20cm de profundidade, e outra em que a disponibilidade hídrica média foi de 91% da CAD, com mínimos de 80% da CAD.

## 4 Irrigação por aspersão

### 4.1 Introdução

Os sistemas de irrigação por aspersão caracterizam-se pela distribuição da água sobre a superfície do solo na forma de gotas, assemelhando-se à chuva. A formação das gotas é resultante da passagem da água, sob pressão, pelos aspersores, que são acessórios dotados de bocais (Figura 4.1), que apresentam grande variedade, quanto às características de funcionamento, como vazão, pressão e tamanho das gotas, entre outras. Para tanto, a água é conduzida até os aspersores através de condutos (tubulações) sob pressão. Em geral, a pressão necessária ao funcionamento destes sistemas é gerada a partir de um conjunto moto-bomba. Entretanto, quando a fonte de suprimento de água se encontra em cotas superiores aos aspersores e o desnível existente é suficiente para gerar a pressão necessária ao funcionamento destes, é possível fazer a distribuição da água por gravidade. Esta última situação, entretanto, ocorre com menor frequência, ficando mais restrita aos sistemas onde são utilizados aspersores de baixa pressão.



Figura 4.1 – Aspersor.

A agricultura irrigada está, cada vez mais, se firmando como uma das principais vias de atendimento à crescente demanda por alimentos. Entretanto, fatores como a necessidade de produzir cada vez mais, com menor impacto sobre o meio ambiente, e racionalizando ao máximo o consumo de água e de energia, demonstram a importância da correta escolha e utilização das tecnologias disponíveis.

A irrigação por aspersão, é uma das formas de irrigação que vem apresentando grande expansão. Neste tipo de irrigação estão incluídos métodos como a aspersão convencional, o pivô central, o canhão autopropelido e o carretel enrolador.

Uma das questões mais freqüentes sobre os diferentes métodos de irrigação por aspersão é: qual o melhor método? A resposta é: não existe um método que seja melhor do que os demais em todas as situações. Para cada situação, a escolha do método de irrigação mais adequado vai depender de uma série de fatores, entre os quais estão: cultura, tipo de solo, clima, disponibilidade de água, topografia, tamanho da área a ser irrigada, recursos financeiros disponíveis e infra-estrutura da propriedade.

Uma vez definido o método de irrigação a ser utilizado, é necessário realizar o dimensionamento do sistema, quando serão estabelecidos os equipamentos que serão empregados para a captação, condução e distribuição da água. A escolha do método de irrigação e seu posterior dimensionamento, devem ser realizados com o acompanhamento de um profissional devidamente habilitado para este serviço. Entretanto, não são raras as situações em que o produtor decide, por conta própria, comprar equipamentos diretamente de uma empresa, baseado apenas na opinião de um vendedor, ou buscando montar um sistema semelhante a algum outro que ele já viu funcionando, em outra propriedade. Esta é uma decisão arriscada, pois, nas vezes em que o sistema funciona, aparentemente sem problemas, o produtor poderá estar desperdiçando dinheiro, sem perceber.

Em muitas ocasiões, o produtor considera que seu sistema de irrigação está “funcionando bem”, pelo simples fato de fornecer água, em abundância, para toda a área irrigada, sem saber que talvez fosse possível alcançar resultados iguais, ou até melhores, com custos mais baixos, através da escolha de equipamentos mais adequados ou através de uma operação mais correta dos equipamentos que dispõe.

Muitos dos problemas de falta de eficiência na irrigação, não estão relacionados com a falta de água, mas com seu uso inadequado, podendo causar produção desuniforme, aumento no surgimento de doenças, lavagem de insumos, erosão do solo, perdas de fertilidade, consumo excessivo de água e de energia, entre outros problemas, sempre resultando em perdas econômicas para o produtor.

#### **4.2 Aspectos positivos**

O método de irrigação por aspersão apresenta uma série de aspectos positivos. Alguns, quando comparados com os demais métodos de irrigação, podem ser considerados como vantagens em potencial. Entre os principais, podem ser citados:

- a) em relação à topografia da área a ser irrigada, apresenta maior flexibilidade do que os métodos de irrigação por superfície, não havendo necessidade de sistematização do terreno. Dependendo do sistema adotado, pode ser utilizado em terrenos com até 60% de declividade (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006);
- b) pode ser utilizado em praticamente todo tipo de solo, independentemente das taxas de infiltração apresentadas, incluindo solos arenosos de alta permeabilidade;
- c) adapta-se com facilidade a solos com diferentes capacidades de armazenamento de água;
- d) apresenta baixas perdas na condução de água;
- e) quando utilizado com taxas de irrigação (intensidade de precipitação) adequadas, apresentam risco reduzido de provocar erosão hídrica, por não gerar escoamento superficial;
- f) apresenta níveis reduzidos de percolação de água, evitando as perdas de fertilidade do solo causadas pela lixiviação de nutrientes através da água de irrigação;
- g) pode ser implantado para irrigação de culturas permanentes já estabelecidas;
- h) possibilita atingir elevados níveis de uniformidade de distribuição de água sobre toda a área cultivada, bem como um elevado controle das quantidades de água aplicadas;

- i) permite a aplicação de pequenas lâminas de água, podendo ser utilizado como facilitador de outras atividades, como, por exemplo, redução da formação de poeira durante atividades de preparo de solo, ou facilitador da germinação, pelo amolecimento de crosta superficial;
- j) permite a adição de fertilizantes e defensivos juntamente com a água de irrigação;
- k) apresenta consumo de água geralmente inferior ao dos métodos de irrigação superficial (maior eficiência de aplicação);
- l) possibilita altos níveis de automação da atividade, reduzindo custos com mão-de-obra, bem como os custos com energia elétrica, pelo uso noturno da irrigação, em horários de tarifa reduzida;
- m) possibilita implantar sistemas que tenham pouca ou nenhuma influência sobre o tráfego de máquinas e implementos;
- n) possibilita a implantação de sistemas sem necessidade de serviços de mobilização do solo;
- o) possibilita o aproveitamento de um mesmo sistema em diferentes áreas de cultivo.

Alguns dos aspectos positivos, acima listados, são inerentes aos métodos de irrigação por aspersão. Outros, entretanto, requerem condições adequadas quanto ao sistema escolhido, seu dimensionamento e operação.

### **4.3 Limitações**

A irrigação por aspersão possui algumas características que podem limitar sua utilização, ou que requerem maiores cuidados no dimensionamento, implementação e operação dos sistemas. Algumas destas características são:

- a) muitos sistemas exigem elevadas pressões para seu funcionamento, inviabilizando a condução de água por gravidade e acarretando custos na operação do conjunto moto-bomba;
- b) parte da água de irrigação pode ficar retida na parte aérea das plantas, causando aumento nas perdas por evaporação;

- c) ao criar na área irrigada um microclima mais úmido, bem como molhar a parte aérea das plantas, a aspersão cria condições mais favoráveis ao surgimento de pragas e doenças;
- d) os equipamentos necessários à condução e distribuição da água podem tornar os custos dos sistemas bem elevados;
- e) a uniformidade da distribuição da água é afetada pela velocidade e direção do vento;
- f) em certas combinações de solo, clima e qualidade da água disponível, pode gerar problemas de salinização dos solos;
- g) os sistemas são mais afetados, de forma negativa (desgastes, corrosão e incrustações), por problemas de qualidade da água, do que os sistemas de irrigação por superfície;
- h) requer mão-de-obra qualificada para a operação dos sistemas e manuseio dos equipamentos;
- i) na fase inicial de estabelecimento das culturas, ocorre o umedecimento de áreas não aproveitadas pelas plantas cultivadas, reduzindo a eficiência dos sistemas e favorecendo o estabelecimento de plantas espontâneas;
- j) o impacto da água sobre as plantas pode danificar flores e frutos;
- k) o impacto da água sobre o solo pode causar degradação da estrutura e favorecer a formação de crosta superficial;
- l) a água de irrigação pode provocar a remoção de insumos, como fungicidas e inseticidas da parte aérea das plantas.

O conhecimento das limitações apresentadas é fundamental para orientar a adoção de estratégias de irrigação adequadas ao sistema água-solo-planta-atmosfera, característico de cada situação.

#### **4.4 Sistemas de irrigação por aspersão**

Os sistemas de irrigação por aspersão podem ser classificados em:

- a) convencionais;
- b) mecanizados.

Nos sistemas de irrigação por aspersão convencionais, durante a irrigação de cada parcela, tanto os aspersores como as tubulações, que conduzem a água

desde a fonte de suprimento, permanecem na mesma posição, ao longo do tempo de funcionamento dos aspersores. Nestes sistemas, após cada irrigação, é possível transferir parte do equipamento, ou mesmo todo o equipamento, de uma parcela irrigada para outra, em um sistema de rodízio. Quando todos os aspersores e tubulações participam do sistema de rodízio, diz-se que o sistema é convencional portátil. Entretanto, quando apenas os aspersores e parte das tubulações são trocados de lugar, enquanto outras tubulações permanecem fixas, diz-se que o sistema é convencional semiportátil. No caso de todo o equipamento permanecer no mesmo local, ao longo de todo o período de irrigação, diz-se que o sistema é convencional fixo. Os sistemas convencionais fixos podem ser do tipo temporário, quando são removidos, ao fim da safra ou do período de irrigação. Podem também ser permanentes, ficando no mesmo local durante vários anos.

Nos sistemas de irrigação por aspersão mecanizada, os aspersores são instalados em estruturas que se movimentam, ao longo da parcela irrigada, durante o funcionamento do sistema. Alguns dos principais sistemas de irrigação mecanizada são: pivô central, autopropelido e deslocamento linear.

Cada um destes sistemas apresenta variações quanto à forma de propulsão, alternativas de trajetória, tipos de aspersores, nível de controle e automação, e área irrigável.

Uma classificação dos principais sistemas de irrigação por aspersão é apresentada na Figura 1.3.

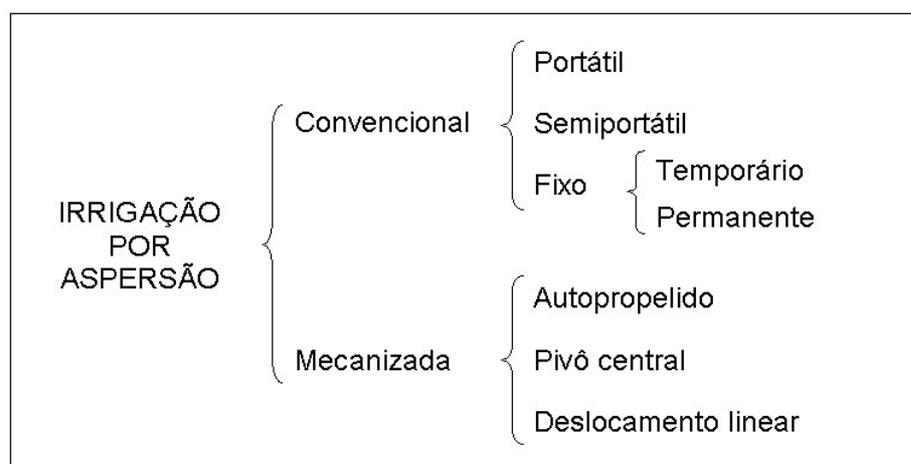


Figura 4.2 – Classificação dos principais sistemas de irrigação por aspersão.

## **4.5 Características e escolha dos aspersores**

Em um sistema de irrigação por aspersão, a correta escolha e operação de seus diversos componentes, desde a tubulação de sucção até os aspersores, passando pelo conjunto moto-bomba, terá influência direta sobre a eficiência do sistema. Neste item, serão apresentados os aspectos que devem ser considerados na hora de fazer a escolha do tipo de aspersor a ser utilizado, mostrando alguns tipos de aspersores, suas principais características e suas possibilidades de aplicação.

Os aspersores estão na ponta final do sistema de distribuição de água e sua escolha irá afetar o dimensionamento de todos os demais componentes do sistema. Atualmente, existem diversos fabricantes, que fornecem dezenas de modelos de aspersores, que variam desde os do tipo canhão, que fornecem grandes vazões e são capazes de irrigar individualmente grandes áreas, até os microaspersores, utilizados na irrigação localizada, que fornecem pequenas vazões e cobrem áreas bastante reduzidas.

### **4.5.1 Caracterização técnica dos aspersores**

Para determinar as especificações de funcionamento de um aspersor, não basta conhecer apenas a marca do fabricante e o modelo. Outras características de funcionamento devem ser informadas pelos fabricantes, sendo as mais comuns abordadas a seguir.

#### **4.5.1.1 Diâmetros dos bocais**

Os diâmetros dos bocais identificam os tamanhos dos orifícios de saída de água. Os aspersores apresentam, em geral, 1 ou 2 bocais para saída de água, sendo que alguns fabricantes oferecem a possibilidade de diferentes bocais substituíveis, para um mesmo modelo de aspersor. Dessa forma, é possível adaptar um mesmo aspersor, para diferentes condições de funcionamento, através da substituição de seus bocais.



Figura 4.3 – Aspersores convencionais, com diferentes bocais.

#### 4.5.1.2 Vazão

A vazão indica a quantidade de água fornecida pelo aspersor, em um determinado espaço de tempo, geralmente expressa em  $\text{m}^3/\text{h}$ . Existem desde pequenos aspersores convencionais, com vazões em torno de  $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$ , até aspersores do tipo canhão, com vazões acima de  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ .

#### 4.5.1.3 Pressão de serviço

A pressão de serviço identifica a pressão com que a água deve chegar ao aspersor, para que o mesmo atinja as condições de funcionamento indicadas pelo fabricante. Nos sistemas de irrigação por aspersão, para conseguir uma boa uniformidade de distribuição da água na área irrigada, é fundamental que os aspersores funcionem com pressões próximas à pressão de serviço, pois variações da mesma afetam as demais características de funcionamento. Em muitos modelos de aspersores, uma variação de 20% na pressão da água provoca uma variação de aproximadamente 10% na vazão fornecida. A pressão com que a água chega aos aspersores é afetada por diversos fatores, como diâmetro e comprimento das tubulações, pressão fornecida pelo conjunto moto-bomba e topografia, entre outros. Por este motivo, um critério para o dimensionamento do sistema, geralmente adotado, é limitar a diferença de pressão entre os aspersores a 20% da pressão de

serviço. Isto equivale a limitar a diferença de vazão admissível entre os aspersores a, aproximadamente, 10% da vazão indicada.

#### **4.5.1.4 Raio de alcance**

O raio de alcance indica a que distância máxima o aspersor irá lançar a água. A maioria dos aspersores molha uma área circular ao seu redor. O raio de alcance é um dos fatores a ser considerado no estabelecimento do espaçamento entre aspersores.

#### **4.5.1.5 Intensidade de aplicação**

A intensidade de aplicação, também conhecida como intensidade de precipitação ou taxa de irrigação, identifica a lâmina média de água fornecida pelo aspersor, em um dado intervalo de tempo. A escolha de um aspersor, com uma intensidade de aplicação adequada, é fundamental para se obter uma irrigação eficiente. A intensidade de aplicação deve ser compatível com a capacidade de infiltração do solo, para evitar problemas de escoamento superficial da água. A intensidade de aplicação irá determinar o tempo necessário para que seja aplicada a quantidade de água requerida em cada irrigação.

#### **4.5.1.6 Espaçamento**

Como, em geral, a precipitação de um aspersor é maior na parte central do círculo molhado e vai diminuindo em direção à borda, é necessário garantir uma sobreposição entre as áreas molhadas pelos aspersores, como forma de compensação. O espaçamento indica as distâncias entre as posições dos aspersores, de forma a se obter uma sobreposição adequada de áreas molhadas e uma distribuição de água aproximadamente uniforme, na área irrigada. A Figura 4.4 ilustra a característica de molhamento de um único aspersor e de um conjunto de quatro aspersores, com disposição quadrangular, na qual pode ser visto o efeito da sobreposição das áreas molhadas. Em geral, os espaçamentos indicados pelos fabricantes são valores múltiplos de seis, pois as tubulações de PVC são fornecidas em varas de 6 m de comprimento.

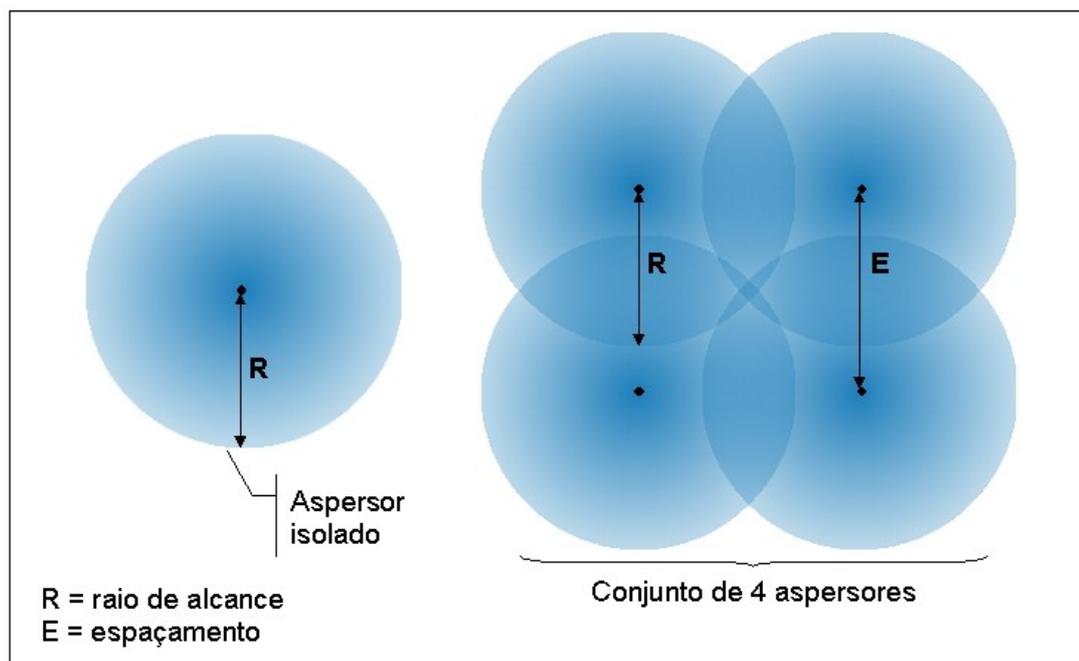


Figura 4.4 – Representação da característica de molhamento de um único aspersor e de um conjunto de quatro aspersores, com configuração quadrangular.

A forma como os fabricantes de aspersores divulgam as especificações técnicas relativas aos seus produtos é variável. O nível mínimo de informação inclui: modelo, diâmetros dos bocais, pressão de serviço, vazão e raio de alcance. Na Tabela 2.1 é apresentado um exemplo de conjunto de informações técnicas de um aspersor comercial.

Tabela 4.1 – Características técnicas de um aspersor comercial.

Diâmetro dos bocais (mm)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Pressão (mca*)	Raio de alcance (m)	Espaçamento (m)	Área útil irrigada (m <sup>2</sup> )	Precipitação (mm/h)
4,5x4,8	2,60	25	14,7	18x18	324	8,03
	2,84	30	15,6	18x18	324	8,76
5,0x5,5	3,63	30	16,3	18x24	432	8,41
	3,93	35	16,6	18x24	432	9,10
	4,20	40	17,0	18x24	432	9,72
5,0x7,5	5,34	30	18,0	18x24	432	12,38
	5,76	35	19,2	24x24	576	10,00
	6,17	40	20,0	24x24	576	10,71
6,0x8,5	7,11	30	18,0	18x24	432	16,48
	8,21	40	19,0	24x24	576	14,25
	8,72	45	19,5	24x24	576	15,13
6,0x9,5	8,30	30	18,5	24x24	576	14,42
	8,98	35	19,0	24x24	576	15,58
	10,1	45	21,5	24*30	720	14,03

\*mca = metros de coluna de água.

## 4.5.2 Tipos de aspersores

Existe uma grande variedade de aspersores para irrigação, desde os pequenos aspersores de jardim, que funcionam ligados a uma mangueira, utilizando a pressão das torneiras residenciais, até grandes aspersores, do tipo canhão, que requerem pressões dezenas de vezes maior. A seguir são apresentados alguns dos principais tipos de aspersores e suas características básicas.

### 4.5.2.1 Aspersores convencionais

Também conhecidos como aspersores de impacto. O jato de água, que sai do aspersor, empurra uma haste móvel, contra a ação de uma mola. Esta mola força o retorno da haste a sua posição original provocando um impacto, que causa o giro do aspersor em torno de seu eixo. Existe uma grande variedade destes aspersores no mercado. Pode-se encontrar aspersores que trabalham com baixas pressões, em torno de 10 mca (100 kPa), pequenas intensidades de aplicação, em torno de 1 mm/h e com raio de alcance de 6 m. Por outro lado, encontram-se aspersores com pressão de 60 mca (600 kPa), intensidades de aplicação em torno de 30 mm/h e raio de alcance superior a 20 m. Em geral, os espaçamentos utilizados com estes aspersores pode variar de 6 a 36m. Devido a esta variedade de modelos, este é o tipo de aspersor mais utilizado em sistemas de irrigação por aspersão, pois se adapta a quase todos os tipos de culturas e solos.

### 4.5.2.2 Aspersores sub-copa

São aspersores convencionais, porém com ângulo de inclinação do jato quase horizontal (5 a 8°), a fim de evitar que seja molhada a parte aérea das plantas (Figura 4.5). São indicados para culturas frutíferas e ornamentais, quando não for conveniente molhar frutos, folhas ou flores.



Figura 4.5 – Aspersor sub-copa.

#### 4.5.2.3 Canhões hidráulicos

São aspersores que trabalham com pressões médias e altas, na faixa de 30 a 90 mca e cujo raio de alcance pode variar de 25 a 80m (Figura 4.6). Podem ser ligados diretamente às tubulações, da mesma forma que os aspersores convencionais, ou montados sobre estruturas móveis, para permitir o deslocamento ao longo da área irrigada. São indicados para áreas maiores, com culturas pouco sensíveis ao impacto das gotas, como pastagens, cana-de-açúcar, etc.



Figura 4.6 – Canhão hidráulico.

#### 4.5.2.4 Aspersores setoriais

Possuem a capacidade de molhar apenas uma parte de um círculo. Possibilitam uma maior uniformidade de distribuição de água, quando a área a ser irrigada é muito estreita e são usados aos pares, nas laterais da área. São indicados para fazer irrigação junto a cercas e construções. São também utilizados em sistemas de irrigação mecanizada, como os sistemas autopropelidos, para garantir que o caminho do equipamento seja molhado apenas após a passagem das rodas, evitando problemas de patinagem e atolamento.

#### 4.5.2.5 Aspersores retráteis

São aspersores projetados para serem instalados pouco abaixo da superfície do terreno, permanecendo ocultos durante o tempo em que não estiverem

funcionando (Figura 4.7). Quando colocados em funcionamento, a pressão da água provoca a elevação da haste do aspersor, que passa então a irrigar a área. É indicado para pastagens, parques e jardins. Apresenta a vantagem de ser bastante discreto e de não interferir, nem ser danificado, nos trabalhos de campo e no trânsito de pessoas e animais.



Figura 4.7 – Aspersor retrátil antes e após instalação.

#### 4.5.2.6 Microaspersores

Denominação geral dada a um conjunto de aspersores de pequenas dimensões (Figura 4.8), que trabalham com baixas pressões e pequeno raio de alcance. São indicados para irrigação de culturas em linha e irrigação de sub-copa. Possibilitam irrigar o solo, sem molhar a parte aérea das plantas, reduzindo o risco de incidência de doenças. São indicados, também, para utilização em estufas, em viveiros para silvicultura e plantas ornamentais. Os microaspersores são de uso mais freqüente em sistemas de irrigação localizada, entretanto, também são utilizados em sistemas de irrigação por aspersão convencional (Figura 4.9) e seu emprego na irrigação mecanizada está crescendo, devido à expansão dos sistemas de precisão e de baixa pressão. O raio de alcance destes equipamentos varia em torno de 0,5 a 10 m. Alguns modelos, chamados autocompensantes, possuem mecanismos para uniformizar a precipitação fornecida, sendo indicados, principalmente, para linhas de irrigação mais longas. Os dois principais tipos de microaspersores são os estáticos (ou estacionários) e os rotativos.



Figura 4.8 – Alguns modelos de microaspersores.



Figura 4.9 – Microaspersor em lavoura.

#### 4.5.2.6.1 Microaspersores estáticos

Também conhecidos como “sprays”, são aspersores que não apresentam partes móveis. Distribuem a água pelo direcionamento de um jato contra um defletor de distribuição. O impacto do jato de água, contra o defletor, causa sua pulverização e distribuição. O formato do defletor determina o padrão de distribuição da água e o tamanho das gotas. Em geral, para um mesmo modelo de aspersor, os fabricantes oferecem diferentes opções de defletores, para que possa ser escolhido o que melhor se adapte às necessidades da cultura que será irrigada. Trabalham com pressões, na faixa de 4 a 30 mca (40 a 300 kPa). São bastante utilizados em irrigação localizada, mas podem ser utilizados em sistemas de pivô central, através do uso de pendurais reguláveis, proporcionando uma aplicação de água mais próxima da cultura e com uso de menores pressões. Alguns destes aspersores produzem uma precipitação bastante pulverizada, formando uma névoa no interior dos viveiros, sendo utilizados para controlar as condições climáticas para a produção de mudas que necessitem de alta umidade relativa. São os chamados

“nebulizadores”. Alguns modelos podem ser utilizados tanto fixados ao solo, com o jato dirigido para cima, como fixado no teto de estufas, com o jato dirigido para baixo (Figura 4.10).



Figura 4.10 - Microaspersor em teto de estufa.

#### 4.5.2.6.2 Microaspersores rotativos

São pequenos aspersores que apresentam um emissor de água rotativo. O movimento do emissor é provocado pelo impulso obtido a partir do próprio jato de água que ele emite. Alguns modelos apresentam a capacidade de recolhimento do orifício emissor, quando não estão em funcionamento, para evitar a entrada de poeira e insetos, evitando seu entupimento (Figura 4.11).



Figura 4.11 - Microaspersor rotativo em posição de funcionamento (esquerda) e em repouso (direita).

A escolha dos aspersores, requer o conhecimento das características das alternativas disponíveis. Existem diversos fatores, vantagens e desvantagens, que devem ser levados em consideração. Um aspersor que produza uma aplicação de água mais pulverizada, por exemplo, possui menor potencial de dano a flores e

frutos, porém aumenta as perdas por evaporação, bem como a deriva de água, provocada pelo vento. Os principais fatores que devem ser considerados são: o espaçamento, a intensidade de aplicação, a uniformidade de distribuição, a forma da área de molhamento, a altura de montagem, o potencial de deriva, o impacto das gotas sobre o solo e as plantas, a pressão requerida e a vazão necessária. Uma escolha bem fundamentada é o melhor caminho para alcançar resultados satisfatórios, com custos mais baixos e menor risco de dano ao ambiente.

#### **4.6 Aspersão convencional**

A irrigação por aspersão convencional, se caracteriza pela manutenção dos aspersores no mesmo local, durante o tempo necessário para aplicação da lâmina de água requerida em cada irrigação.

Este sistema é basicamente composto por:

- a) aspersores: que recebem a água sob pressão e a espalham sobre a área a ser irrigada na forma de gotas;
- b) linhas de suprimento: formadas por tubulações que conduzem a água desde a fonte de suprimento até os aspersores. Estas tubulações podem ser dispostas diretamente sobre o terreno ou ser enterradas, dependendo do tipo de sistema instalado. As tubulações mais utilizadas são as de PVC, alumínio, aço galvanizado e polietileno;
- c) conjunto moto-bomba: composto por um motor elétrico ou diesel e uma bomba, geralmente centrífuga, que retira a água da fonte de suprimento e injeta, sob pressão, nas tubulações;
- d) acessórios: conjunto de peças utilizadas para o manejo e controle da irrigação. As peças mais utilizadas são os registros para controle da vazão, válvulas de proteção hidráulica do sistema e tubos de subida (ou porta-aspersores), para elevar os aspersores acima da altura das plantas.

Este sistema admite diversas possibilidades de montagem, com diferentes opções quanto à intensidade de aplicação de água, disposição do sistema na área irrigada, mobilidade do equipamento, qualidade da água e nível de automação.

Os aspersores mais utilizados na aspersão convencional são os de impacto, com um ou dois bocais de saída.

#### 4.6.1 Linhas de suprimento

Na aspersão convencional, é fundamental a correta caracterização das linhas de suprimento para o dimensionamento do sistema. Na Figura 4.12 estão representadas as linhas de distribuição de água, em um sistema de irrigação por aspersão convencional, considerando que todos os aspersores da área estão funcionando simultaneamente, a exemplo do que ocorre nos sistemas fixos. Sendo assim, os pontos 3, 4 e 5, mostrados no conjunto de 16 aspersores do lado esquerdo da figura, possuem pontos equivalentes no conjunto do lado direito.

##### 4.6.1.1 Linha principal

Linha principal é a tubulação de recalque ligada diretamente ao conjunto moto-bomba. Na Figura 4.12, corresponde ao trecho 1-2 e se caracteriza por conduzir integralmente a vazão recalçada pela bomba. Ao longo da linha principal a vazão se mantém constante.

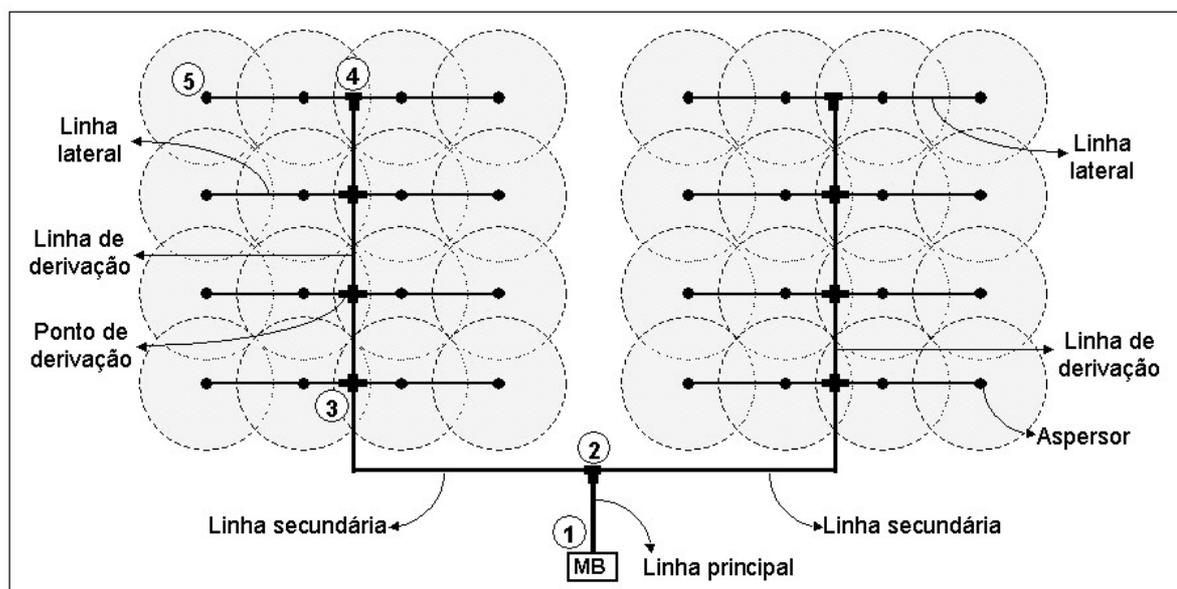


Figura 4.12 - Representação das linhas de distribuição em sistema de irrigação por aspersão convencional.

#### **4.6.1.2 Linha lateral**

Corresponde à tubulação onde estão instalados os aspersores (trecho 4-5). Inicia no ponto de entrada da água na tubulação (ponto 4), terminando no último aspersor (ponto 5). Ao longo da linha lateral, a vazão é máxima no ponto de entrada e vai sofrendo reduções a cada ponto de saída para os aspersores. Em irrigação de pastagens e culturas de porte muito baixo, os aspersores podem ser fixados diretamente sobre a linha lateral. Entretanto, o mais comum é conectar verticalmente um tubo à linha lateral e instalar o aspersor no topo do mesmo. Este tubo é denominado tubo de subida ou porta-aspersor, tendo, geralmente, o mesmo diâmetro da entrada do aspersor e altura igual ou um pouco superior à altura máxima das plantas.

#### **4.6.1.3 Linha de derivação**

Linha de derivação é a tubulação a qual estão conectadas duas ou mais linhas laterais, em funcionamento simultâneo (trecho 3-4), causando variação de vazão ao longo da mesma. No esquema da Figura 4.12, existem duas linhas de derivação. Uma para cada conjunto de 16 aspersores. Os locais onde são conectadas as linhas laterais são denominados pontos de derivação. Ao longo da linha de derivação, a vazão é máxima no início da linha (ponto 3) e vai diminuindo à medida que passa por cada ponto de derivação. Nem todos os sistemas de aspersão convencional possuem linha de derivação. É o caso dos sistemas em que a tubulação alimenta apenas uma linha lateral de cada vez, ou apenas um par de laterais conectadas no mesmo ponto de derivação.

#### **4.6.1.4 Linha secundária**

É a primeira ramificação da linha principal, sendo caracterizada por ter vazão constante ao longo de toda sua extensão, mas conduzir apenas uma parcela da vazão recalçada (trecho 2-3). Se ocorrerem novas ramificações da vazão, após a linha secundária e antes de chegar a linha de derivação, as linhas resultantes serão denominadas terciárias e assim sucessivamente. Muitos sistemas de irrigação por aspersão não possuem linhas secundárias. Se, por exemplo, no esquema mostrado na Figura 4.12, cada conjunto de 16 aspersores, fosse colocado em funcionamento

em horários não coincidentes, a vazão que fosse recalçada pela bomba seria constante do ponto 1 ao ponto 3, ficando este trecho caracterizado como linha principal.

#### 4.6.2 Sistema portátil

Sistema portátil é aquele em que todas as linhas, da lateral à principal, são trocadas de lugar, durante o período de irrigação com a finalidade de irrigar diferentes parcelas, utilizando o mesmo equipamento.

Para tanto, as linhas são montadas sobre a superfície do terreno e as tubulações constituídas de material leve, como alumínio e PVC, para possibilitar o transporte manual das tubulações, que são dotadas de sistemas de engate denominados engate rápido, por possibilitarem conectar e desconectar as tubulações de forma simples e rápida.

Em algumas situações, até mesmo o conjunto moto-bomba acompanha o deslocamento do sistema, podendo ser instalado sobre uma carreta móvel para facilitar o transporte. A Figura 4.13 ilustra o esquema de operação de um sistema portátil operando com apenas uma linha lateral. Inicialmente, apenas a linha lateral é movimentada, para irrigar as 4 parcelas de um dos lados. Posteriormente, todo o sistema é deslocado, para irrigar as 4 parcelas do outro lado.

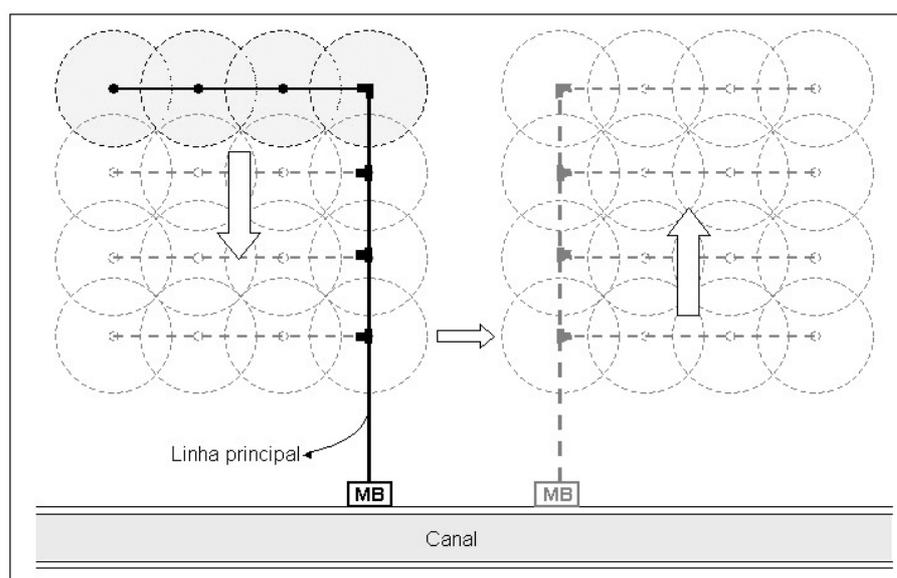


Figura 4.13 - Representação de sistema convencional portátil.

Os sistemas portáteis são largamente utilizados, pois, por ocuparem o mesmo equipamento em áreas diferentes, são os que apresentam os menores custos relativos entre os sistemas de irrigação por aspersão.

Outro aspecto positivo dos sistemas portáteis, é que em épocas em que o produtor não está irrigando, os equipamentos podem ser alugados para outros produtores.

Uma limitação dos sistemas portáteis é o uso mais intensivo de mão-de-obra, em relação aos demais sistemas de aspersão. Dependendo do tamanho das linhas e das distâncias de deslocamento, cada troca pode consumir de 20 a 40 minutos.

Uma variação do sistema portátil é o sistema de linhas laterais rebocáveis, que são semelhantes às linhas laterais manualmente deslocáveis, exceto pelo fato de utilizarem tubulações de acoplamento rígido, sendo as linhas laterais geralmente rebocadas de um lugar para outro por um trator.

#### **4.6.2.1 Sistema portátil do tipo montagem direta**

O sistema de irrigação por montagem direta consiste em um aspersor do tipo canhão e um conjunto moto-bomba montados sobre um chassi com rodas, que pode ser rebocado por um trator (Figura 4.14a). A moto-bomba abastece o canhão com água que é retirada diretamente de um canal construído paralelamente ao caminho de deslocamento do equipamento. A ponta da tubulação de sucção que fica mergulhada no canal é dotada de um sistema de bóia para manter sua profundidade constante (Figura 4.14b).

Este sistema é classificado como de aspersão convencional portátil, pois enquanto o sistema está em funcionamento, não ocorre deslocamento do conjunto pela área irrigada. Apenas o canhão executa suas rotações, até que tenha sido distribuída a lâmina de água desejada, quando o sistema é desligado e rebocado para o próximo ponto de irrigação (parcela).

Para aumentar o alcance do sistema e reduzir o número de canais que devem ser construídos, alguns sistemas utilizam tubulações como extensores ou mangueiras flexíveis. Com este artifício a distância do aspersor ao conjunto moto-bomba varia de 80 a 900 m.

O sistema apresenta como principais limitações a necessidade de construção de canais através da área irrigada, o que torna este sistema de uso limitado a áreas planas, ou requer a sistematização parcial do terreno.

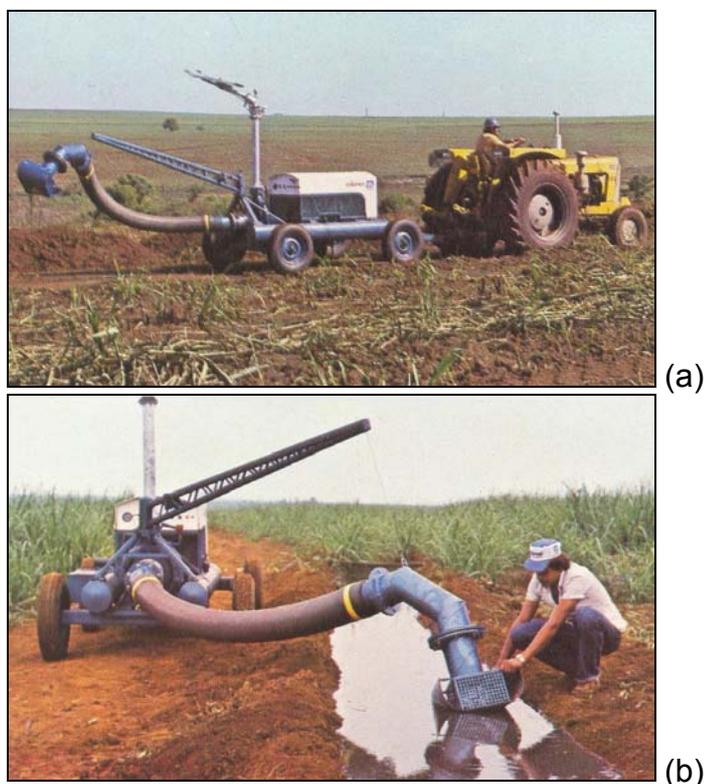


Figura 4.14 - Sistema de montagem direta: (a) em deslocamento, (b) instalação da sucção (DAEE-SP).

Por utilizarem aspersores de alta pressão, esses sistemas de irrigação podem expor o jato pulverizado a alturas superiores a 7 m acima da superfície do solo, o que o torna mais susceptível à deriva das gotas pelo vento e à evaporação da água.

#### 4.6.2.2 Sistema portátil do tipo lateral rolante estacionária

O sistema de aspersão do tipo lateral rolante, consiste em um conjunto de aspersores fixados sobre uma tubulação retilínea, que também funciona como um eixo, ao redor do qual giram rodas, que sustentam a tubulação acima do solo e são utilizadas para deslocar o sistema, perpendicularmente ao eixo longitudinal da

tubulação (Figura 4.15). Em geral utilizam aspersores rotativos de impacto de média pressão (200 a 400 kPa).



Figura 4.15 - Sistema tipo lateral rolante (DAEE-SP).

Durante o funcionamento dos aspersores, o sistema permanece no mesmo local. Quando a irrigação é encerrada, naquela posição, o funcionamento dos aspersores é interrompido e o sistema é deslocado até a próxima posição de irrigação, quando os aspersores são novamente postos em funcionamento.

Este sistema pode ser encontrado em duas versões:

- a) movimentação manual;
- b) movimentação motorizada.

Os dois sistemas possuem praticamente as mesmas características, porém os de movimentação manual são de menor comprimento, em torno de 60 a 160 m.

O sistema com movimentação motorizada (Figura 4.16) se movimenta de uma posição de irrigação para outra, através de um motor a gasolina (ou diesel), geralmente montado na parte central do sistema. As tubulações são em alumínio, com 4" ou 5" de diâmetro (100 ou 125 mm), formadas por tubos de 12m de comprimento. Em geral, os tubos que ficam de cada lado da unidade motora possuem 6 m de comprimento e paredes mais espessas, a fim de aumentar a resistência do conjunto. O comprimento total do sistema varia de 100 a 400 metros. As rodas metálicas possuem diâmetro entre 1,3 e 3 metros, o que limita o sistema, em relação ao porte das culturas.



Figura 4.16 - Sistema tipo lateral rolante motorizado (J. McNee).

Este sistema é indicado para áreas quadradas e retangulares, de topografia plana, sendo abastecido através de uma mangueira flexível, conectada a hidrantes localizados em pontos estratégicos, ao longo da linha de deslocamento, geralmente com espaçamento de 18 metros.

Quando o sistema termina a irrigação em uma posição, o operador fecha o registro do hidrante e desconecta a mangueira de alimentação. Neste momento, um sistema de válvulas de drenagem automaticamente entra em ação, devido à queda da pressão na tubulação, esvaziando a mesma. O operador então liga o motor e o sistema se desloca até o próximo ponto, quando o operador desliga o motor, conecta a mangueira no próximo hidrante e abre o registro. As válvulas de drenagem se fecham automaticamente quando o sistema é novamente pressurizado. Os aspersores são dotados de um sistema de nivelamento automático para permanecerem na posição correta. A operação de troca de posição do equipamento consome em torno de 20 minutos.

O sistema motorizado poderia ser classificado como irrigação mecanizada, porém foi descrito neste ponto, pelo fato de não ocorrer movimentação do sistema durante o funcionamento dos aspersores. Dependendo do tipo de linha de alimentação dos hidrantes utilizada o sistema poderá ser classificado como portátil ou semiportátil.

### **4.6.3 Sistema semiportátil**

No sistema semiportátil (também chamado semifixo) algumas das linhas de distribuição permanecem no mesmo local durante todo o período de irrigação. As linhas laterais são do mesmo tipo utilizado no sistema portátil, sendo trocadas de lugar, durante o período de irrigação. A linha principal é fixa, sendo, na maioria das vezes, enterrada. Dependendo da configuração do sistema no campo, se existirem linhas secundárias e de derivação, estas podem ser fixas ou móveis. Todas as linhas enterradas utilizam engates rígidos.

Da mesma maneira que o sistema portátil, o semiportátil permite utilizar uma mesma linha lateral para irrigar diferentes locais, com a vantagem de consumir menos tempo e mão-de-obra na movimentação do sistema, já que parte das linhas não requer movimentação. Esta característica contribui para que o sistema seja muito utilizado no Brasil.

O custo inicial deste sistema é mais alto que o do portátil, pois necessita mais tubulações e um maior número de acessórios de operação e controle. Caso as tubulações fixas sejam enterradas, ainda devem ser somados os custos de abertura e fechamento de valetas para enterrar as tubulações.

### **4.6.4 Sistema fixo**

O sistema fixo se caracteriza pela manutenção de todas as linhas, inclusive as laterais, no mesmo local, ao longo de todo o período de irrigação. É um sistema de custo inicial mais alto do que os anteriores, pois utiliza ainda mais tubulações e um número também maior de acessórios de operação e controle. Caso as tubulações fixas sejam enterradas, devem ser somados, também, os custos de assentamento das tubulações.

Caso todas as tubulações sejam enterradas, o sistema é dito fixo permanente. Entretanto, se as tubulações permanecem no campo, apenas durante o período a época de irrigação, sendo posteriormente armazenados ou utilizados em outro local, o sistema é dito fixo temporário.

#### **4.6.4.1 Sistema fixo temporário**

No sistema fixo temporário, após a instalação das linhas no campo, todas permanecem no local onde foram instaladas, até o final do período de irrigação, quando são removidas para armazenamento ou outra finalidade.

A vantagem deste sistema é que a instalação é feita após as atividades de preparo de solo e semeadura, e as linhas são removidas ao final do período de irrigação, pouco antes da colheita, facilitando o trânsito das máquinas no campo.

#### **4.6.4.2 Sistema fixo permanente**

Neste sistema, todas as tubulações são enterradas. Apenas os tubos porta-aspersor e os próprios aspersores ficam aparentes.

Estes sistemas são mais facilmente automatizáveis, uma vez que alguns dispositivos de controle e as fiações ficam enterradas, o que reduz os custos com mão-de-obra.

O sistema apresenta a vantagem de facilitar a manutenção dos tubos porta-aspersores na vertical, pois como as linhas laterais são enterradas, o próprio solo pode dar a sustentação necessária.

Outra vantagem deste sistema, é a maior flexibilidade no estabelecimento do espaçamento entre aspersores, pois o mesmo não precisa ficar limitado a valores múltiplos do comprimento das varas de tubulação.

Este sistema se adapta melhor para culturas permanentes, sendo mais utilizado em pomares e pastagens (Figura 4.17).

O sistema de aspersão em malha, também chamado de grade, consiste na utilização de aspersores de baixa pressão, dispostos com pequenos espaçamento e alimentados por um sistema de linhas laterais conectadas entre si nos dois extremos. São sistemas que operam com vazão e pressão baixas e tempos de irrigação mais longos, o que permite a utilização de tubulações de menor diâmetro, podendo ser utilizados tubos de polietileno, o que reduz os custos e o tempo de instalação.



Figura 4.17 - Sistema de aspersão fixo recém instalado (S. Rutz).

A instalação dos sistemas fixos permanentes, especialmente o sistema em malha, exige uma grande movimentação de terra durante a instalação do sistema (Figura 4.18). Se esta operação não for feita de forma criteriosa, podem ocorrer problemas de erosão e danos à estrutura do solo.



Figura 4.18 - Implantação de sistema de aspersão fixo (S. Rutz).

## **4.7 Aspersão mecanizada**

A irrigação por aspersão mecanizada, se caracteriza pela movimentação dos aspersores ao longo da parcela irrigada, durante o tempo necessário para aplicação da lâmina de água requerida em cada irrigação. A movimentação dos aspersores é feita através de estruturas dotadas de sistema de propulsão, elétrico, diesel ou hidráulico.

Na aspersão mecanizada são utilizados praticamente todos os tipos de aspersores, desde pequenos pulverizadores de pressão muito baixa, até canhões hidráulicos de alta pressão.

Atualmente os sistemas do tipo autopropelido, pivô central e deslocamento linear são os tipos mais utilizados. Cada um destes sistemas apresenta variações quanto à forma de propulsão, alternativas de trajetória, tipos de aspersores, nível de controle e automação, e área irrigável.

### **4.7.1 Autopropelido**

Os sistemas de irrigação por aspersão autopropelidos são compostos por um aspersor (ou conjunto de aspersores) instalado sobre uma estrutura apoiada sobre rodas, a qual se desloca longitudinalmente, através da parcela irrigada, sendo o movimento proporcionado pela energia hidráulica gerada pela passagem da água de irrigação através de uma turbina e de um mecanismo de transmissão. Dessa forma, a aplicação de água e o deslocamento do sistema sobre o terreno ocorrem simultaneamente.

Os principais tipos de sistemas autopropelidos podem ser divididos entre os que são tracionados por um cabo e os que são tracionados pela própria mangueira de alimentação do sistema (carretel enrolador). Nos dois sistemas ocorre o arraste da mangueira de alimentação sobre o terreno, sendo o desgaste da mesma um ponto crítico do sistema.

Os principais aspectos positivos dos sistemas autopropelidos são:

- a) possibilidade de usar o mesmo equipamento para irrigar diferentes áreas;

- b) facilidade na elaboração do projeto, especialmente em relação à parte hidráulica, quando comparado com os sistemas de aspersão convencionais;
- c) economia de mão-de-obra.

As principais limitações destes sistemas são:

- a) elevado consumo de energia, quando comparados como os sistemas de irrigação por superfície ou de aspersão convencional;
- b) a uniformidade de distribuição é muito afetada pela ação do vento;
- c) o impacto das gotas pode provocar danos a flores e frutos;
- d) as mangueiras estão sujeitas a grande desgaste, o que resulta em custos de manutenção.

#### **4.7.1.1 Tractionados por cabo**

Nestes sistemas o aspersor fica instalado sobre uma pequena carreta (Figura 4.19) dotada de dois carretéis. Um dos carretéis é usado para o armazenamento da mangueira de alimentação do sistema, enquanto o outro é responsável por recolher o cabo de tração do conjunto, que fica esticado longitudinalmente no centro da parcela a ser irrigada. O cabo de aço é ancorado em um dos extremos da parcela e a mangueira de alimentação é conectada a um registro localizado no centro da parcela. Sendo assim, a mangueira de alimentação possui aproximadamente a metade do comprimento do cabo de tração, que, por sua vez, possui comprimento igual à distância de deslocamento do sistema.

A carreta com o aspersor é posicionada no extremo oposto ao ponto de ancoragem do cabo tracionador. Nesta posição, tanto a mangueira como o cabo ficam totalmente esticados e o sistema está pronto para entrar em funcionamento. Quando o registro de abastecimento do sistema é aberto, a água sob pressão passa por um sistema de transmissão, localizado na própria carreta, que faz girar o carretel do cabo tracionador, enrolando o cabo e tracionando a carreta em direção ao ponto de ancoragem, ao mesmo tempo em que o aspersor faz a distribuição de água sobre o terreno.



Figura 4.19 - Autopropelido tracionado por cabo (DAEE-SP).

A medida em que o sistema se movimenta, a mangueira de alimentação vai sendo arrastada sobre o solo pela carreta, de um extremo ao outro da parcela. Quando a carreta atinge o final da parcela, a mangueira está novamente esticada e o cabo de tração totalmente enrolado. A partir de então, a ancoragem pode ser desfeita e a mangueira rebobinada, possibilitando a transferência do conjunto para a próxima parcela a ser irrigada.

Este tipo de equipamento autopropelido é de concepção mais antiga, apresentando, geralmente, níveis mínimos de automação e custos de aquisição mais baixos em relação aos modelos tracionados pela mangueira.

#### **4.7.1.2 Tracionados pela mangueira (carretel enrolador)**

Os sistemas autopropelidos, tracionados pela mangueira, são compostos por uma unidade tracionadora (carretel enrolador) e um carrinho de suporte do aspersor (Figura 4.20). A unidade tracionadora consiste basicamente de um carretel, onde fica enrolada a mangueira de abastecimento do aspersor, um sistema de transmissão, que utiliza a energia hidráulica para acionar o carretel, e um mecanismo de controle das condições de funcionamento do sistema.



Figura 4.20 - Autopropelido tracionado pela mangueira (Krebsfer).

Ao longo do comprimento da parcela a ser irrigada, o carretel enrolador é ancorado junto à extremidade onde se localiza o registro de alimentação. O carrinho de suporte do aspersor, com a mangueira conectada, é então rebocado até a extremidade oposta da parcela, desenrolando a mangueira. Quando o registro de alimentação é aberto, o aspersor entra em funcionamento, ao mesmo tempo em que o carretel começa a recolher a mangueira, puxando o carrinho de volta, em direção à unidade tracionadora.

Quando o carrinho retorna ao ponto em que se encontra o carretel enrolador, completando a irrigação da parcela, a mangueira estará totalmente rebobinada e o sistema estará pronto para ser transferido para a próxima parcela. Este aspecto representa uma vantagem em relação aos sistemas tracionados por cabo, nos quais, após encerrada a irrigação, ainda será preciso rebobinar a mangueira.

Em alguns equipamentos a movimentação do sistema é proporcionada por um motor, ao invés de utilizar a energia hidráulica gerada no sistema de turbina. Em geral, o sistema de turbina apresenta uma série de vantagens, por ser menos exigente, em termos de operação e manutenção. O sistema de turbina não envolve operações de abastecimento de combustível ou troca de óleo, nem operações de partida e parada de motor. Quando o bombeamento é iniciado, a turbina entra em operação. Quando o bombeamento é interrompido, a turbina pára. Entretanto, o uso de motores se justifica quando:

- a) existe necessidade de maiores velocidades de deslocamento: maiores velocidades servem para obter a aplicação de menores

- lâminas de água. Equipamentos movidos por motores podem atingir o dobro da velocidade dos equipamentos movidos por turbina;
- b) a água aplicada é de má qualidade: a presença de sedimentos e materiais abrasivos tende a danificar o sistema de turbina;
  - c) as pressões disponíveis estão no limite: quando a pressão disponível para o sistema se encontra muito próxima da pressão de serviço do aspersor, é indicado o uso de motor, pois o sistema de turbina reduz de 4 a 10 mca (40 a 100 kPa) a pressão disponível, dependendo do modelo e da velocidade de deslocamento do sistema.

Sistemas autopropelidos podem ser encontrados com as mais diversas capacidades, existindo desde modelos que utilizam aspersores de baixa pressão, cobrindo áreas, em uma passagem, com menos de 1,0 ha e vazões inferiores a  $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , até equipamentos com capacidade para irrigar mais de 25 ha por dia, trabalhando com pressões acima de 120 mca (1,2 MPa) e vazões superiores a  $170 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Uma variação dos sistemas autopropelidos é o sistema de barra irrigadora, no qual, ao invés de ser utilizado um aspersor com alcance suficiente para atingir toda a faixa irrigada, é utilizada uma barra (tubulação) dotada de um conjunto de aspersores de pequeno alcance (Figura 4.21), assemelhando-se aos pulverizadores agrícolas. Este sistema requer pressões de serviço mais baixas, o que resulta em menor potência exigida e permite obter uma maior uniformidade na distribuição da água, bem como precipitações menos intensas, com gotas menores e de menor força de impacto. Estas características são importantes quando se tem interesse em preservar a integridade das flores, por exemplo.



Figura 4.21 - Autopropelido tracionado pela mangueira, com barra irrigadora.

### 4.7.2 Pivô central

Um pivô central consiste em uma tubulação linear, ao longo da qual é fixada uma série de aspersores, que se movimentam lateralmente, acima da altura das plantas, sustentada por torres sobre rodas (Figura 4.22), em uma trajetória circular, em torno de um ponto fixo (pivô - Figura 4.23), localizado no início da tubulação. Apesar de ser classificado como um sistema de irrigação diferenciado, o pivô central também é um sistema autopropelido, sendo sua movimentação produzida por um conjunto de transmissão de força que provoca o giro das rodas de todas as torres, de forma individual e coordenada.



Figura 4.22 - Extremidade final de um pivô central.



Figura 4.23 - Extremidade inicial de um pivô central. Ponto fixo.

O sistema de pivô central foi desenvolvido por Frank Zybach, um produtor rural, em Strasburg, Colorado (EUA), em 1948, tendo sido patenteado em 1952. Em 1978 foi produzido o primeiro pivô central fabricado no Brasil. Nesta época, apenas no estado de Nebraska (EUA), já existiam aproximadamente 10.000 unidades em operação (NUTT-POWELL; LANDERS, 1979), sendo que em 2001 a área irrigada pelo sistema de pivô central, naquele estado, ultrapassou 1,8 milhões de hectares, representando 63% da área irrigada total (JOHNSON; BRUMMELS; KUENNING, 2001). No Brasil estima-se que a venda de 800 a 1000 unidades por ano, esteja produzindo um acréscimo anual de 50.000 ha na área irrigada com este sistema (TEIXEIRA; MELO; COELHO, 2007).

Originalmente, os pivôs eram movimentados através de um sistema hidráulico, que aproveitava parte da energia da água, passando pela tubulação para acionar turbinas cujo movimento era transmitido às rodas. Posteriormente, surgiram modelos acionados por sistema hidráulico a óleo e por motores elétricos. Atualmente, a maioria dos pivôs possui pequenos motores elétricos e conjuntos redutores instalados na base de cada torre, que são responsáveis pela movimentação das rodas. Em geral os conjuntos moto-redutores empregam motores com potência entre 0,5 e 1,5CV.

As torres mais próximas do centro, percorrem distâncias menores para completar uma volta, enquanto que as torres mais distantes percorrem distâncias maiores (maior perímetro). Sendo assim, para que as torres mantenham um certo alinhamento, é necessário que as mesmas se desloquem com diferentes velocidades. Portanto, as torres mais distantes do centro possuem maior velocidade de deslocamento.

Em cada torre, no encontro entre as tubulações de dois vãos consecutivos, existe uma junta articulada, que é um pequeno tubo, geralmente confeccionado em borracha sintética, resistente a altas pressões. O alinhamento do sistema é controlado a partir da última torre. Em todos os pontos de união entre dois vãos, existe um mecanismo que controla a maior ou menor velocidade da torre anterior, em função do ângulo de inclinação em os dois vãos.

Um pivô central comum irriga uma área circular, cujo tamanho depende do raio molhado pelo pivô. A área irrigada por um pivô central pode ser determinada pela seguinte equação:

$$A = \frac{\pi \cdot R^2}{10.000} \quad (4.1)$$

em que: A = área irrigada, em ha;

R = raio molhado pelo pivô, em m.

O fato da área irrigada pelo pivô central ser diretamente proporcional ao quadrado do raio molhado, tem implicações muito importantes sobre diversas questões, como custos, dimensionamento hidráulico e operação dos equipamentos.

Ao dobrar o comprimento do raio molhado de um pivô, multiplica-se por quatro a área irrigada. Enquanto um pivô de 200 m de raio molhado irriga uma área de 12,57 ha, um pivô de 400 m de raio molhado é capaz de cobrir 50,27 ha. Esta característica tende a fazer com que os custos por hectare diminuam, à medida que aumenta o comprimento do raio molhado. A Figura 4.24 ilustra a evolução da área irrigada por um pivô central, em função de seu raio de cobertura.

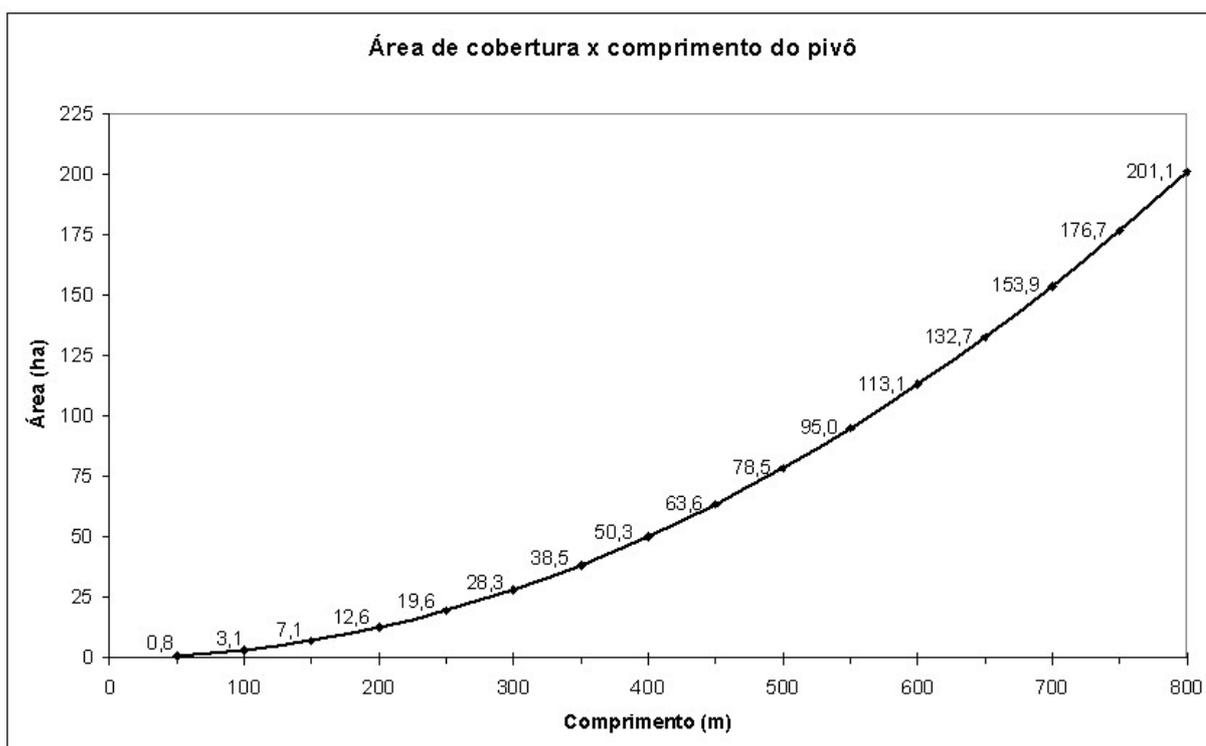


Figura 4.24 - Evolução da área de cobertura do pivô (em ha), em função de seu comprimento (em metros).

Alguns sistemas possuem um lance de tubulação em balanço, ligado à última torre, permitindo um aumento na área irrigada, por um menor custo relativo (Figura 4.25).



Figura 4.25 - Lance em balanço em linha de pivô central setorial.

Também com a finalidade de aumentar o alcance do sistema, alguns equipamentos são dotados, no final da tubulação, de um aspersor do tipo canhão. Caso o pivô seja dotado deste canhão, o valor de  $R$  deve incluir, além do comprimento da linha, o raio de alcance do canhão. Adotando este procedimento, obtém-se a área irrigada, caso o canhão permaneça em funcionamento durante a rotação completa do pivô. Em muitos modelos existe a opção de ligar e desligar o canhão, permitindo que o mesmo seja utilizado apenas quando o final da linha se aproxima dos cantos da área cultivada, possibilitando que a forma da área irrigada fique mais próxima a de um quadrado.

Os aumentos da área de cobertura dos pivôs são acompanhadas por aumentos, na mesma proporção, dos volumes de água bombeados pelo sistema. Isto significa que, para um mesmo tempo de irrigação, tem-se um aumento na vazão, o que implica em aumento na potência necessária e no consumo de energia, bem como na necessidade de tubulações de maior diâmetro, a fim de evitar perdas de carga muito elevadas no sistema.

A medida em que aumenta o raio molhado do pivô, os incrementos de área irrigada são crescentes. A Figura 4.26 ilustra o incremento de área irrigada de um

pivô, para cada 100 m de incremento no comprimento da linha de irrigação. A área de cobertura dos últimos 100 m da linha (34,6 ha) é 11,16 vezes a área de cobertura do primeiro trecho de 100 m (3,1 ha). Como o tempo para completar a volta é igual para todos os trechos, percebe-se que a vazão do último trecho será 11,16 vezes a vazão do primeiro.

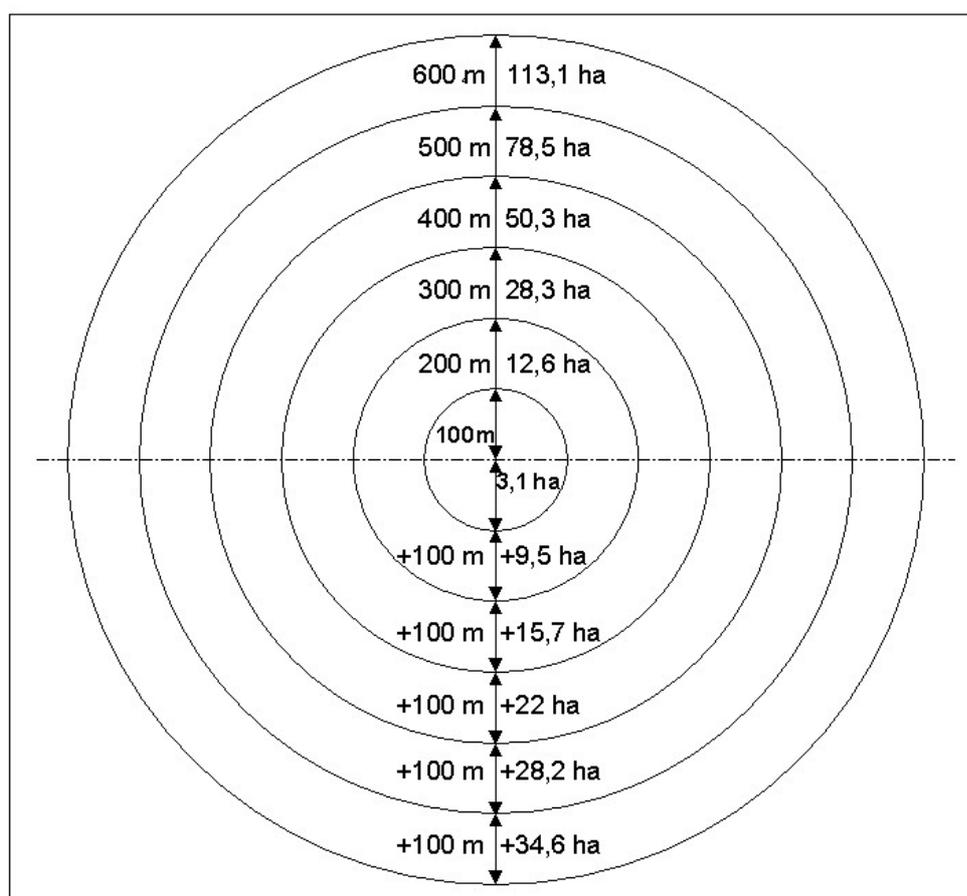


Figura 4.26 - Aumento da área irrigada para cada 100 m de aumento no comprimento do pivô.

Em um pivô de 200 m de raio molhado, um aspersor situado na extremidade da linha terá de percorrer uma distância de 1256,6 m para completar uma volta, enquanto em um pivô de 400 m, esta distância aumenta para 2513,3 m. Isto significa que, com o aumento do comprimento do raio de irrigação, tem-se um aumento progressivo na velocidade de deslocamento das torres, o que gera um aumento na potência de acionamento e no consumo de energia do sistema.

Um ponto crítico, relacionado ao aumento no raio de cobertura dos pivôs, é o aumento no risco de ocorrência de erosão do solo, causada por escoamento superficial, nas áreas mais afastadas do centro do pivô. Como a velocidade de deslocamento das torres aumenta com a distância em relação ao centro do pivô, os aspersores mais distantes do centro irão cobrir um mesmo tamanho de área de terreno em um menor tempo. Como a lâmina de água aplicada deve ser uniforme, para compensar a redução no tempo de oportunidade de aplicação da lâmina, é necessário ocorrer um aumento na intensidade de aplicação de água (precipitação ou taxa de irrigação). Caso a intensidade de aplicação supere a capacidade de infiltração do solo, parte da água de irrigação irá se acumular sobre a superfície do terreno, podendo causar escoamento superficial e erosão.

A intensidade de precipitação sobre um ponto no terreno, varia à medida que a linha do pivô passa sobre o mesmo, sendo que seu comportamento pode ser estimado por uma função, na forma de uma semi-elipse, como proposto por Gilley (1984):

$$IP_t = \frac{IP_{\max}}{t_{\max}} \cdot (2 \cdot t \cdot t_{\max} - t^2)^{0,5} \quad (4.2)$$

em que:  $IP_t$  = intensidade de precipitação no tempo  $t$ , em  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;

$IP_{\max}$  = intensidade de precipitação máxima, em  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;

$T_{\max}$  = tempo para atingir a intensidade de precipitação máxima, em minutos;

$t$  = tempo transcorrido desde o início da precipitação, em minutos.

Considerando a forma semi-elíptica da distribuição no tempo da intensidade de precipitação, o valor da  $IP$  máxima pode ser estimado por:

$$IP_{\max} = \frac{4}{\pi} \cdot IP_{\text{med}} \quad (4.3)$$

em que:  $IP_{\text{med}}$  = intensidade de precipitação média, em  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Para exemplificar o efeito do aumento no comprimento do pivô sobre a intensidade de precipitação, considere-se um pivô que deva distribuir uma lâmina bruta de água de 8 mm, em uma volta de 20 horas. Em uma volta, um aspersor que tenha 16 m de diâmetro de cobertura e esteja localizado a 50 m do centro do pivô, cobrirá uma distância de 314,16 m, em 20 horas. Portanto, os 16 m correspondentes

ao seu diâmetro de cobertura, serão percorridos em 1,02 horas, que será o tempo para aplicar uma lâmina média de 8 mm. Isto resulta em uma precipitação média de 7,84 mm/h. De forma análoga, na mesma volta, um aspersor, com o mesmo diâmetro de cobertura, que esteja localizado a 300 m do centro do pivô, cobrirá uma distância de 1.884,96 m, no mesmo tempo. Portanto, os 16 m correspondentes ao seu diâmetro de cobertura, serão percorridos em 0,17 horas, resultando em uma precipitação média de 47,06 mm/h.

Na Figura 4.27 podem ser observadas as curvas de velocidade de infiltração (VI) para dois solos distintos (A e B), em função do tempo de aplicação de água, bem como a curva de intensidade de precipitação (IP) em um ponto do terreno, sob irrigação por pivô central. Pode ser observado que, para o solo A, a intensidade de precipitação é inferior à velocidade de infiltração de água no solo, durante todo o tempo de aplicação. Isto indica que toda a água aplicada poderá ser absorvida pelo solo. Por outro lado, para o solo B, durante um certo intervalo de tempo, a velocidade de infiltração fica abaixo da intensidade de precipitação, indicando que, durante este período, naquele ponto, estará sendo aplicada uma quantidade de água maior do que a que solo consegue absorver, ocasionando acúmulo de água sobre o terreno, e podendo gerar escoamento superficial, com conseqüente aumento no risco de erosão. A área hachurada representa o volume de água aplicado, que excede a capacidade de infiltração do solo.

A curva de distribuição da intensidade de precipitação é determinada por fatores como a vazão dos aspersores, velocidade de deslocamento do pivô e posição ao longo da linha de irrigação, constituindo um parâmetro importante na escolha e operação do sistema.

O tempo necessário para uma rotação completa do pivô é função de fatores como o tamanho do sistema, a capacidade da bomba ou da fonte de suprimento e a quantidade de água que deve ser aplicada em cada irrigação.

A lâmina de água aplicada (lâmina bruta) em cada volta depende da velocidade de deslocamento do equipamento, a qual é ajustada pelo operador do sistema. Se, para um determinado pivô, a taxa de aplicação de água se mantém constante, quanto maior for a lâmina de água a ser aplicada, menor deverá ser a velocidade de deslocamento e maior o tempo de rotação do equipamento.

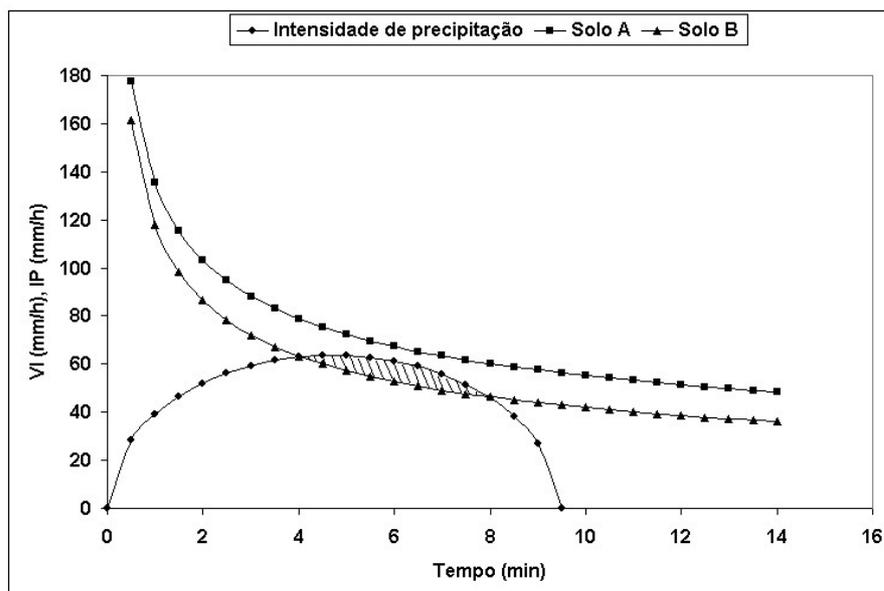


Figura 4.27 - Curva de intensidade de precipitação (IP), para um ponto sob irrigação de pivô central e curvas de velocidade de infiltração (VI) para dois tipos de solo ao longo do tempo.

Os pontos críticos da utilização do pivô central referem-se aos níveis de consumo de energia e ao alto investimento inicial, bem como aos efeitos da alta intensidade de aplicação na extremidade do pivô, sobre o escoamento superficial. Outro ponto crítico é o limite de declividade para utilização do sistema, que varia de acordo com as características de cada modelo, mas que, freqüentemente, fica abaixo de 15%.

#### 4.7.2.1 Pivôs com rotação incompleta

Por ter uma trajetória circular, os pivôs comuns deixam sem irrigação aquelas áreas que poderiam ser cultivadas, mas encontram-se fora do círculo de alcance do equipamento. Para contornar esta limitação, em áreas retangulares ou de formato irregular, existe a possibilidade de adotar pivôs com rotação incompleta (Figura 4.28), ou dotados de mecanismos especiais, que permitam alterar o formato da área irrigada. Estas alternativas, entretanto, elevam o custo relativo do equipamento (custo por hectare).

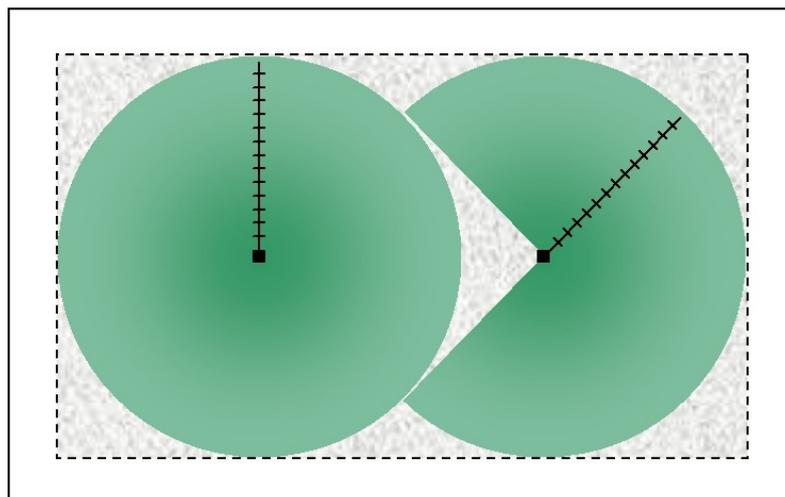


Figura 4.28 - Representação de uso conjunto de pivôs de rotação completa e incompleta.

#### 4.7.2.2 Pivôs rebocáveis

Existem modelos de pivôs projetados para serem transportados de um lugar para outro, permitindo a utilização do mesmo equipamento para a irrigação de diferentes áreas (Figura 4.29). Nestes casos, os rodados das torres são providos de separadores de roda, que permitem desconectar o rodado do sistema de transmissão liberando sua movimentação em outras direções.

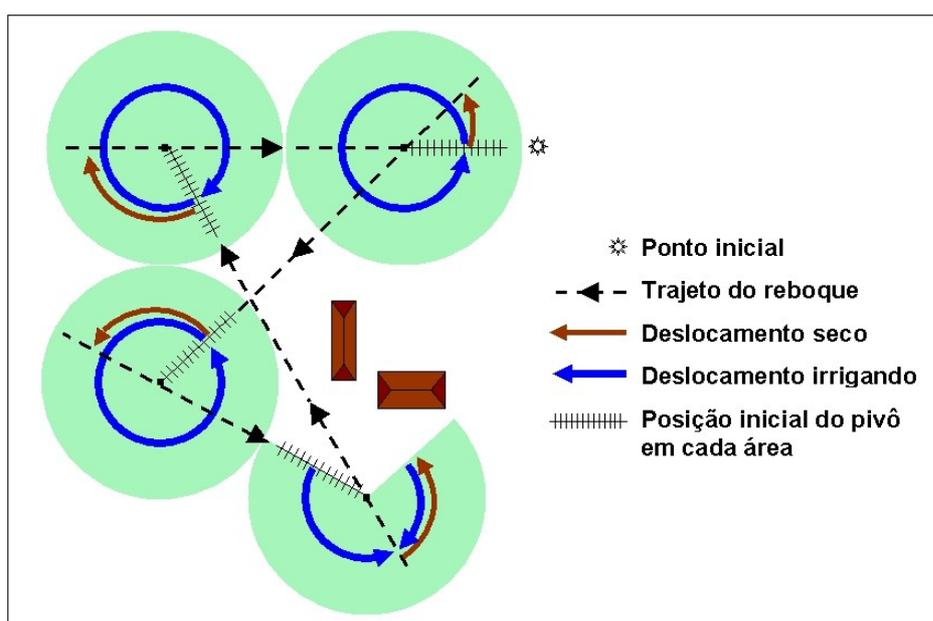


Figura 4.29 - Representação de padrão de deslocamento de pivô central rebocável.

Os pivôs rebocáveis podem ter o ponto central sobre rodas ou sobre sapatas metálicas (Figura 4.30). Devem ser colocados sobre uma base de concreto ou utilizar um sistema de ancoragem ao solo, para impedir que se desloquem do lugar, durante o funcionamento do sistema. Os pivôs sobre sapatas possuem menor custo, mas são indicados apenas para quando as trocas de lugar não são freqüentes.

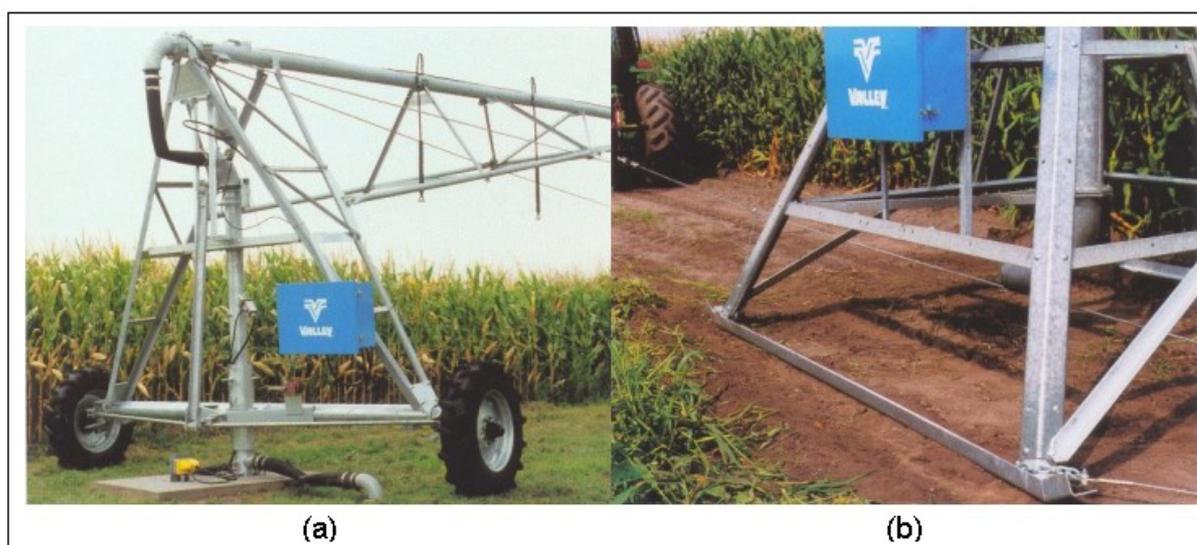


Figura 4.30 - Pivô central rebocável, (a) sobre rodas e (b) sobre sapatas metálicas.

#### 4.7.2.3 Pivôs com braço giratório

A fim de diminuir a limitação dos sistemas de pivô central em irrigar apenas áreas circulares, deixando sem cobertura os cantos das áreas cultiváveis, foram desenvolvidos sistemas dotados de um braço giratório. É um pivô central que possui, no lugar da última torre, uma estrutura montada sobre rodas articuladas, permitindo que o último vão e o vão em balanço girem em relação à última torre comum (Figura 4.31). Esta característica permite alterar o formato da área de cobertura do pivô, cobrindo uma parcela maior de terreno em áreas quadradas e retangulares. Este sistema também pode ser usado para irrigar áreas que tenham construções e outros obstáculos próximos às suas bordas (Figura 4.32).



Figura 4.31 - Pivô central com braço giratório.

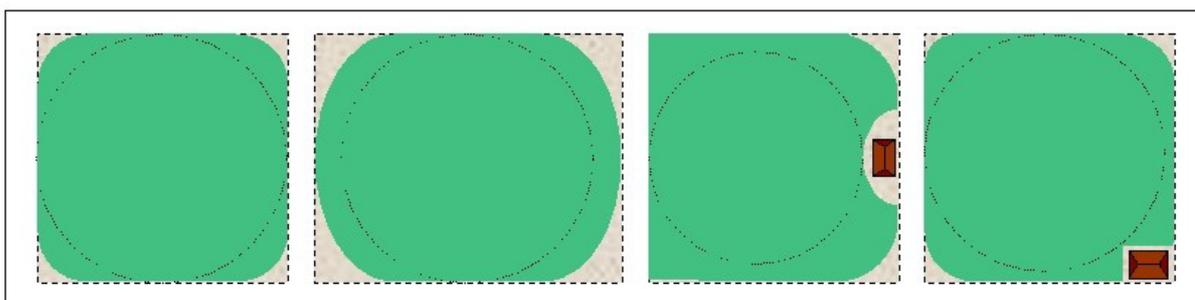


Figura 4.32 - Algumas possibilidades de cobertura de pivô com braço giratório.

Em alguns sistemas, o braço giratório alcança comprimentos em torno de 90 m, incluindo o balanço.

Alguns modelos de pivô, possuem um sistema mecânico que controla a abertura e fechamento dos aspersores do braço giratório, de acordo com o ângulo do braço em relação à linha principal. Outros utilizam um sistema computadorizado, que controla, além da abertura e fechamento, a velocidade de deslocamento do braço giratório, considerando também a pressão disponível no sistema.

Pivôs com braço giratório são mais caros, sendo necessário comparar o custo adicional do braço giratório, com o respectivo ganho de produção resultante do incremento de área irrigada.

#### 4.7.2.4 Pivôs articulados

Outra opção de pivô central para áreas de formato irregular ou com obstáculos, como construções, por exemplo, é o pivô articulado (Figura 4.33). Este sistema possui um mecanismo que pode ser colocado em qualquer uma das torres, que faz com que, a partir de um ponto determinado, o trecho que vai do ponto central fixo do pivô até a torre onde a articulação está instalada, pare de se movimentar, enquanto o trecho que vai da articulação até o final da linha, siga se movimentando. Alguns sistemas permitem ângulos de articulação de até 165°.

Após o realinhamento das torres, este sistema funciona como um pivô convencional.



Figura 4.33 - Pivô articulado.

#### 4.7.2.5 Opções de aspersores

Os aspersores são os acessórios responsáveis por aplicar sobre o terreno, na forma de gotas e com distribuição uniforme, a água retirada da fonte de suprimento. Existe uma grande variedade de opções de montagem de aspersores em pivô central. A escolha do modelo mais adequado requer uma análise comparativa dos aspectos positivos e negativos de cada modelo.

Os modelos de aspersores para pivô central podem ser encontrados em uma faixa de pressões que vai desde 4 mca (40 kPa) até 70 mca (700 kPa). Existe

uma relação direta entre o alcance dos aspersores e a pressão necessária para seu funcionamento. A utilização de aspersores de maior alcance possibilita a utilização de menores intensidades de precipitação, reduzindo o risco de ocorrência de acúmulo de água na superfície e de erosão hídrica. Entretanto, requerem pressões de serviço mais elevadas, o que resulta em maiores pressões na saída da bomba, elevando a potência necessária ao acionamento do sistema.

#### **4.7.2.5.1 Aspersores de alta pressão**

A maioria dos primeiros equipamentos de pivô central trabalhavam apenas com aspersores de alta pressão, os quais necessitam pressões acima de 40 mca (400kPa). A principal limitação destes aspersores está relacionada com o alto consumo de energia, resultante da elevada potência necessária ao seu acionamento, o que tem tornado o seu uso cada vez mais reduzido em sistemas de pivô central.

O principal aspecto positivo destes aspersores, é o seu longo alcance, que proporciona uma distribuição da água sobre grandes áreas, resultando em baixas intensidades de aplicação e reduzindo os riscos de ocorrência de escoamento superficial e erosão. Este aspecto torna viável a sua utilização em solos de baixa capacidade de infiltração e em terrenos onde a declividade seja superior a 10 a 15%.

Além do aspecto de conservação do solo, uma outra questão ambiental pode justificar o uso deste tipo de aspersor. O reúso da água de efluentes parcialmente tratados para irrigação é uma tendência crescente. Esta água contém sólidos que podem obstruir equipamentos que trabalhem com pressões mais baixas e com bocais de menor diâmetro. Alguns equipamentos preparados especificamente para trabalhar com este tipo de água, são dotados de aspersores do tipo canhão, que trabalham com pressões de até 70 mca (700 kPa) e dotados de bocais que variam de 12 a 40 mm de diâmetro.

#### **4.7.2.5.2 Aspersores de média pressão**

Aspersores de média pressão resultam em potências requeridas inferiores a necessária para equipamentos de alta pressão e produzem intensidades de precipitação mais baixas do que os aspersores de baixa pressão. Estes equipamentos necessitam de pressões entre 20 e 40 mca (200 e 400kPa).

O fato de estarem em uma posição intermediária, em termos de consumo de energia e de risco de causar erosão, faz com que estes aspersores tenham uma ampla utilização nos sistemas de pivô central, especialmente em regiões com topografia moderadamente ondulada e solos de textura mais fina.

#### **4.7.2.5.3 Aspersores de baixa pressão**

A busca pela redução do consumo de energia sem perda da uniformidade e da eficiência de aplicação de água tem sido uma das principais metas da indústria e da pesquisa. A utilização de aspersores de baixa pressão, para a redução da pressão de operação, é a maneira mais fácil de diminuir o consumo de energia dos sistemas (GILLEY; WATTS, 1977; GILLEY et al. 1990).

Os aspersores de baixa pressão funcionam sob pressões de 10 mca (100 kPa) a 20 mca (200 kPa). Muitos modelos funcionam como bicos pulverizadores, sem peças móveis, que espalham a água de forma simultânea, ao redor de todo o emissor, em forma de spray (Figura 4.34). Estes modelos tanto podem ser fixados na parte superior da tubulação do pivô, como podem ser instalados invertidos, conectados à tubulação por tubos de descida, ficando posicionados abaixo da tubulação, mais próximos das plantas. Os tubos de decida podem ser rígidos ou flexíveis.

Os sistemas que utilizam pulverizadores sobre a tubulação ou próximo desta, apresentam problemas de deriva e perdas de água, causadas pelo vento e evaporação. Além disso, a menor sobreposição de área molhada pode causar redução na uniformidade.

Quando os pulverizadores ficam posicionados a uma altura entre 0,9 e 1,6 m acima do solo, o sistema é denominado MESA (*“Medium Elevation Spray Application”*) e quando a uma altura entre 0,3 e 0,9 m é denominado LESA (*“Low Elevation Spray Application”*). Quando os tubos de descida passam entre as plantas, é necessário que as linhas de cultivo estejam dispostas em círculos, o que representa um complicador em termos de gerenciamento da lavoura. Nos sistemas de pulverização, a eficiência de aplicação pode ultrapassar 90% (SCHNEIDER, 2000).

Aspersores de baixa pressão possuem área de cobertura relativamente pequena, o que resulta em elevadas intensidades de aplicação de água. Como a

intensidade de precipitação aumenta com o comprimento do pivô, estes aspersores não são recomendados para áreas maiores do que 40 ha. Seu uso é mais indicado para terrenos com declividades inferiores a 5% e solos de textura grosseira e moderadamente grosseira com elevada capacidade de infiltração. Por outro lado, a baixa pressão de funcionamento requerida resulta em menor potência requerida e menor consumo de energia.

Em geral, estes aspersores requerem o uso associado com válvulas reguladoras de pressão, especialmente em pivôs de maior comprimento, para compensar a pressão mais alta no início da tubulação, que é necessária para compensar as perdas de carga que ocorrem ao longo da tubulação.

#### **4.7.2.5.4 Aspersores de pressão muito baixa**

Aspersores que trabalham com pressões muito baixas, de 4 a 10 mca (40 a 100 kPa) (Figura 4.34), instalados em tubos de descida pouco espaçados entre si, estão sendo utilizados em sistemas de irrigação por pivô central, que fazem a aplicação de água, de forma localizada, diretamente junto à superfície do solo ou pouco acima desta (até 0,2 m). Estes sistemas, por exigirem menor potência de acionamento e pela característica de aplicação localizada da água, são denominados de LEPA (*Low Energy Precision Application*) ou sistemas de aplicação de precisão com baixa potência.

Em alguns sistemas, não são utilizados aspersores, mas mangueiras flexíveis, conectadas aos tubos de descida do pivô, denominadas “meias”. Nestes sistemas, como a aplicação é localizada, a taxa de aplicação de água é muito elevada. Por este motivo, é recomendável a utilização de sulcos para a retenção da água nas linhas de passagem dos emissores.

As principais vantagens deste sistema são o baixo consumo de energia, pouca influência do vento sobre a distribuição de água, reduzindo a deriva, e baixa evaporação, sendo um método adequado para regiões planas, com baixa umidade relativa do ar. A eficiência de aplicação, nestas condições, pode atingir 95 a 98% (SCHNEIDER, 2000).

As principais limitações deste sistema estão relacionadas com a elevada taxa de aplicação de água e com a passagem dos tubos de descida entre as plantas, requerendo o cultivo em círculos, com sulcos entre as linhas da cultura.



Figura 4.34 - Aspersores de baixa e muito baixa pressão.



Figura 4.35 - Sistema de aplicação localizada, com sulcos de retenção.

#### 4.7.2.6 Controle e automação

As possibilidades de controle e operação dos sistemas de pivô central têm apresentado grande evolução nos últimos anos. Existem no mercado desde modelos básicos, com controle analógico e controle limitado às funções básicas de funcionamento, até modelos programáveis, com controle digital, assistidos por computador e operados remotamente.

Os modelos básicos, em geral, disponibilizam, além da partida e parada do sistema, funções como:

- a) controle da velocidade (última torre);
- b) controle de partida/parada do canhão.

Algumas outras funções de operação e controle dos sistemas de pivô central que podem ser encontradas são:

- a) programação para iniciar a irrigação em datas e horas pré-definidas, com partida automática do conjunto moto-bomba;
- b) programação de operação do canhão, permitindo controlar em uma mesma volta ou em voltas consecutivas, a partida, parada e pressão;
- c) duplo sistema de controle (analógico e digital), como medida de segurança contra eventuais panes no sistema;
- d) programação por setores, possibilitando obter diferentes características de operação, como lâmina aplicada e intensidade de precipitação, em setores da mesma área de cobertura;
- e) religação automática do equipamento, quando o sistema é pressurizado, após uma parada não programada;
- f) sensor de chuva, com desligamento do sistema;
- g) registro dos tempos de operação e funcionamento com água, permitindo melhor controle de custos e consumo de água e energia;
- h) sistema de operação à distância, permitindo controlar e operar o equipamento a partir da sede da propriedade.

#### **4.7.3 Deslocamento linear**

O sistema de deslocamento linear, também denominado lateral móvel, é semelhante ao pivô central, pois consiste em uma tubulação linear, ao longo da qual é fixada uma série de aspersores, que se movimentam lateralmente, acima da altura das plantas, sobre a área a ser irrigada, sustentada por torres sobre rodas. A diferença consiste no fato de a tubulação não girar ao redor de um ponto fixo, mas se movimentar de maneira uniforme, com uma trajetória perpendicular ao seu eixo longitudinal (Figura 4.36).



Figura 4.36 - Sistema de deslocamento linear (SCHERER, T., 2005).

Este sistema surgiu como uma alternativa, inicialmente direcionada às áreas regulares retangulares, para contornar a limitação do sistema de pivô central, que deixa sem irrigação grandes porções de terreno nos cantos destas áreas.

De forma geral, este sistema se apresenta viável quando o formato da área a ser irrigada apresenta uma relação entre comprimento e largura de, pelo menos, 2:1, ou seja, quando a distância a ser percorrida pelo equipamento é superior ao dobro da linha de irrigação.

Este sistema se ajusta melhor em terrenos relativamente planos, com declividades entre 0 e 4%.

O suprimento de água para os sistemas de deslocamento linear, pode ser feito de duas maneiras:

- a) através de tubulação flexível;
- b) através de canal.

Nos sistemas abastecidos por tubulação flexível, o suprimento de água é semelhante ao utilizado nos conjuntos autopropelidos. O ponto de suprimento geralmente fica localizado no meio da distância a ser percorrida pelo sistema e é conectado ao equipamento por uma tubulação flexível de grande diâmetro, que vai sendo arrastada sobre o terreno, à medida que o mesmo se desloca de um extremo ao outro da área irrigada. Nesta forma de alimentação o sistema de bombeamento

pode ser instalado fixo, junto à fonte de suprimento, que é a alternativa mais comum, ou pode ser montado no próprio sistema de irrigação. Alguns modelos apresentam a possibilidade de alimentar o sistema a partir de qualquer um dos extremos da tubulação de irrigação, o que é importante nos sistemas rebocáveis.

Nos sistemas abastecidos por canal, é necessário construir um canal linear, ao lado do caminho de deslocamento do equipamento. Neste caso o sistema é dotado de um conjunto moto-bomba que succiona a água diretamente do canal de alimentação e a injeta sob pressão na linha de irrigação. A ponta da tubulação de sucção que fica mergulhada no canal é dotada de um sistema de bóia e guia, para manter sua profundidade constante, à medida que se desloca ao longo do canal. Existem modelos que apresentam a opção de alimentação por canal a partir do extremo da tubulação ou pelo centro da tubulação.

Estes sistemas, em geral, possuem um gerador de eletricidade, acionado por um motor diesel, montado na torre de comando principal, que fornece a energia necessária para o funcionamento do equipamento.

Para garantir a trajetória linear do equipamento é necessário instalar algum tipo de mecanismo guia. Em alguns casos, este consiste de um cabo de aço, esticado ao longo do caminho da torre de comando, que é ligada ao mesmo por um sistema de vaivém. Em outros casos o sistema é preparado para seguir um sulco no solo, especificamente construído para esta finalidade. Uma outra alternativa empregada, é o uso de um cabo enterrado, que é seguido pelo equipamento via sinal de rádio.

As linhas de irrigação dos sistemas de deslocamento linear são constituídas de tubulações de 127 a 203,2 mm de diâmetro, dependendo da vazão e do comprimento da linha. O espaçamento entre torres varia de 30 a 70 m. Alguns sistemas possuem um lance de tubulação em balanço, ligado à última torre, permitindo um aumento na área irrigada, por um menor custo relativo. Outros possuem aspersores do tipo canhão instalados na extremidade final da linha ou em ambas as extremidades.

As alternativas de aspersores disponíveis para utilização em sistemas de deslocamento linear são as mesmas existentes para pivô central. Entretanto, em relação à escolha dos aspersores e dimensionamento do sistema, o deslocamento linear apresenta uma importante vantagem sobre o pivô central, que é o fato de

todos os aspersores se deslocarem com a mesma velocidade sobre o terreno. Como a variação de pressão, ao longo da tubulação, pode ser compensada pelo uso de válvulas reguladoras de pressão, é possível utilizar o mesmo modelo de aspersor ao longo de toda a linha. Desta forma, a uniformidade de aplicação de água pode ser bem elevada, o que desestimula o uso dos aspersores canhão nos extremos da linha, pois estes reduzem a uniformidade de distribuição.

Além da uniformidade de aplicação proporcionada por estes sistemas, um outro aspecto positivo, que deve ser considerado, é a flexibilidade em termos de intensidade de aplicação de água, possibilitando adequar a intensidade de precipitação à capacidade de infiltração do solo, tanto para solos de textura mais grosseira, com elevada capacidade de infiltração, até solos de textura mais fina, com restrita capacidade de infiltração.

Pelas características apresentadas, percebe-se que os sistemas de deslocamento linear se tornam vantajosos, em relação ao pivô central, em grandes áreas planas, de formato regular, especialmente quando a capacidade de infiltração é limitada, como as que ocorrem na região sul do Rio Grande do Sul.

As principais desvantagens do deslocamento linear, comparado ao pivô central, são a necessidade de um mecanismo de orientação do equipamento mais complexo, o maior custo de manutenção e a operação mais trabalhosa, especialmente nos sistemas abastecidos por tubulação flexível.

#### **4.7.3.1 Deslocamento linear rebocável**

Assim como os sistemas de pivô central, existem modelos de deslocamento linear projetados para serem transportados de um lugar para outro, permitindo a utilização do mesmo equipamento para a irrigação de diferentes áreas. Nestes equipamentos também são utilizados mecanismos que permitem desconectar o rodado do sistema de transmissão, liberando a movimentação das torres em outras direções.

Estes sistemas são especialmente indicados para grandes áreas regulares, que podem ser divididas em faixas paralelas. As faixas podem ser irrigadas pelo mesmo equipamento, bastando que, ao final da irrigação de uma faixa, o mesmo seja simplesmente deslocado, longitudinalmente, para a faixa seguinte, que será irrigada no sentido inverso (Figura 4.37). Neste caso, para evitar a necessidade de

instalação de duas linhas de suprimento de água para o equipamento, podem ser utilizados equipamentos que admitam alimentação tanto por um extremo como pelo outro.

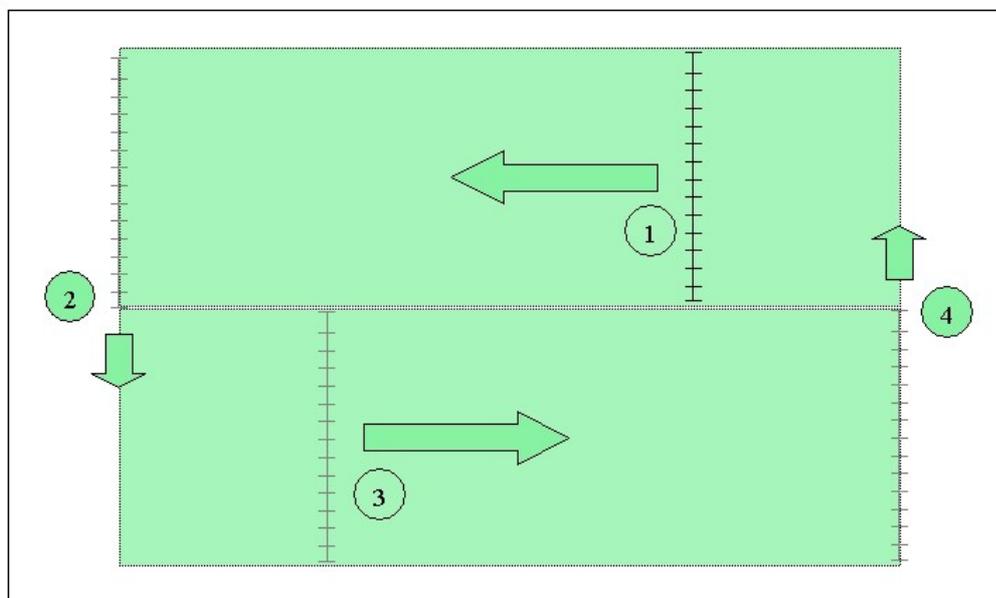


Figura 4.37 - Representação de padrão de movimentação de sistema de deslocamento lateral rebocável, em faixas.

#### 4.7.3.2 Deslocamento linear pivotante

Existem modelos de deslocamento linear equipados para permitir o giro da linha de irrigação, em torno da torre de comando. Estes modelos são denominados pivotantes. Este mecanismo confere ao equipamento maior flexibilidade, tanto para o transporte para diferentes áreas, como para a irrigação de áreas não retangulares (Figura 4.38).

Outra opção existente são os modelos pivotantes e rebocáveis, que conferem maior flexibilidade e aumentam ainda mais as possibilidades de uso do equipamento em áreas não contíguas.

A maioria dos modelos pivotantes oferece a opção de alimentação tanto pela torre de comando como pela última torre.

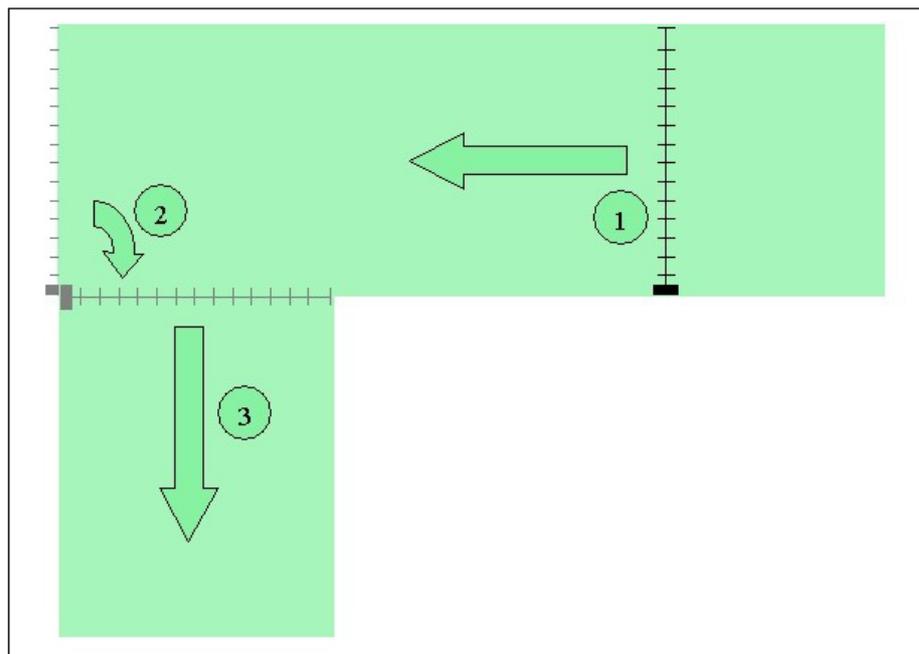


Figura 4.38 - Representação de possibilidade de movimentação de sistema de deslocamento lateral rebocável, pivotante.

#### 4.7.3.3 Deslocamento linear de pressão muito baixa

As características de funcionamento dos equipamentos de deslocamento linear fazem com que estes sejam bastante adequados para a utilização de sistemas de aplicação de baixa pressão e de precisão, que utilizam emissores conectados em tubos de descida, como MESA, LESA e LEPA, tendo a grande vantagem, sobre o sistema de pivô central, de que não é necessário alterar o padrão das linhas de cultivo, quando os aspersores e tubos de descida precisam passar entre as plantas.

Através da adequação dos conjuntos de aspersores ou pelo uso de sistemas de controle de vazão, os sistemas de deslocamento linear permitem irrigar faixas com intensidades de precipitação diferenciadas, possibilitando irrigar simultaneamente faixas com diferentes culturas (Figura 4.39). Esta é uma importante característica em áreas de cultivo voltadas ao melhoramento vegetal.



Figura 4.39 - Sistema de deslocamento linear, com aplicação localizada (J. Kim).

## **5 Elevação de água para irrigação**

### **5.1 Introdução**

Nos cultivos irrigados, especialmente quando direcionados à produção de sementes, a condução, elevação e distribuição de água, assumem um papel de grande importância, tanto para a garantia da produção como da qualidade das sementes, através de um correto manejo da água, quanto para a composição dos custos de produção, que são decisivos em um mercado tão competitivo quanto é o de sementes. Além disso, o consumo de energia e suas implicações em relação ao meio ambiente, torna ainda mais importante o correto dimensionamento dos sistemas de elevação e distribuição de água.

Fatores como a topografia e a localização das fontes de suprimento de água, determinam a forma de sua condução, que tanto poderá ser totalmente feita por gravidade, como envolver o uso de sistemas de elevação mecânica. Na irrigação por aspersão o uso de bombas hidráulicas ocorre em praticamente todos os casos. Atualmente, as bombas centrífugas são a opção mais utilizada para a pressurização dos sistemas de irrigação.

### **5.2 Bombas hidráulicas**

Bombas hidráulicas são máquinas operatrizes hidráulicas que promovem a transformação de energia mecânica em energia hidráulica.

As bombas hidráulicas podem ser volumétricas ou hidrodinâmicas (turbo-bombas). Nas bombas volumétricas a energia pode ser fornecida através de diafragmas, engrenagens e êmbolos (pistões). Nas bombas hidrodinâmicas, a energia é fornecida através de rotores (discos dotados de palhetas), na forma de energia cinética, de pressão ou ambas, gerada pelo movimento rotativo dos

mesmos. As bombas hidrodinâmicas são as mais utilizadas em irrigação para a produção das culturas mais relevantes no mercado de sementes.

Uma das principais classificações das bombas hidrodinâmicas, refere-se à trajetória do líquido em relação ao eixo do rotor e pode ser resumida na forma abaixo:

- a) bombas radiais ou centrífugas: o líquido chega ao rotor com uma trajetória paralela ao eixo do mesmo e apresenta uma trajetória radial ao eixo na saída do rotor;
- b) bombas axiais: o líquido mantém uma trajetória paralela ao eixo do rotor, desde a entrada até a saída;
- c) bombas diagonais ou de fluxo misto: o líquido chega ao rotor com uma trajetória paralela ao eixo do mesmo e apresenta uma trajetória intermediária, entre radial e axial, na saída do rotor.

A maioria das bombas utilizadas é do tipo centrífuga ou radial. Por este motivo, tornou-se generalizado o uso do termo "bombas centrífugas", como uma denominação geral para as turbo-bombas. Por esta razão, adotaremos este termo, na forma descrita, no presente texto.

Na Figura 5.1 são mostrados os cortes longitudinal e transversal de uma bomba centrífuga, identificando seus principais componentes.

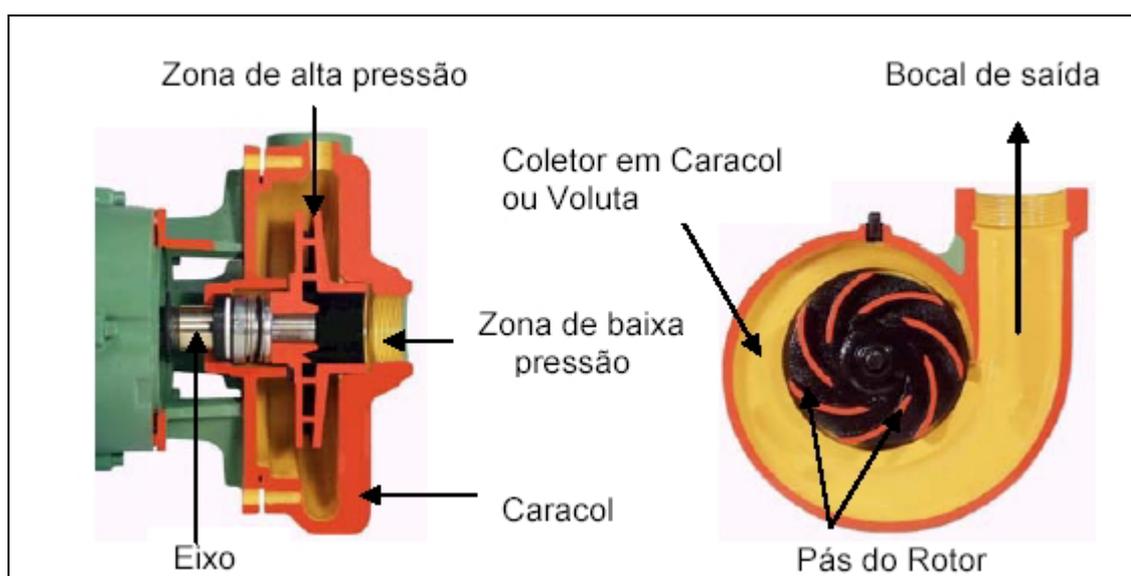


Figura 5.1 - Cortes longitudinal (esq.) e transversal (dir.) de uma bomba centrífuga.

A Figura 5.2 ilustra os componentes típicos de um sistema de bombeamento de água.

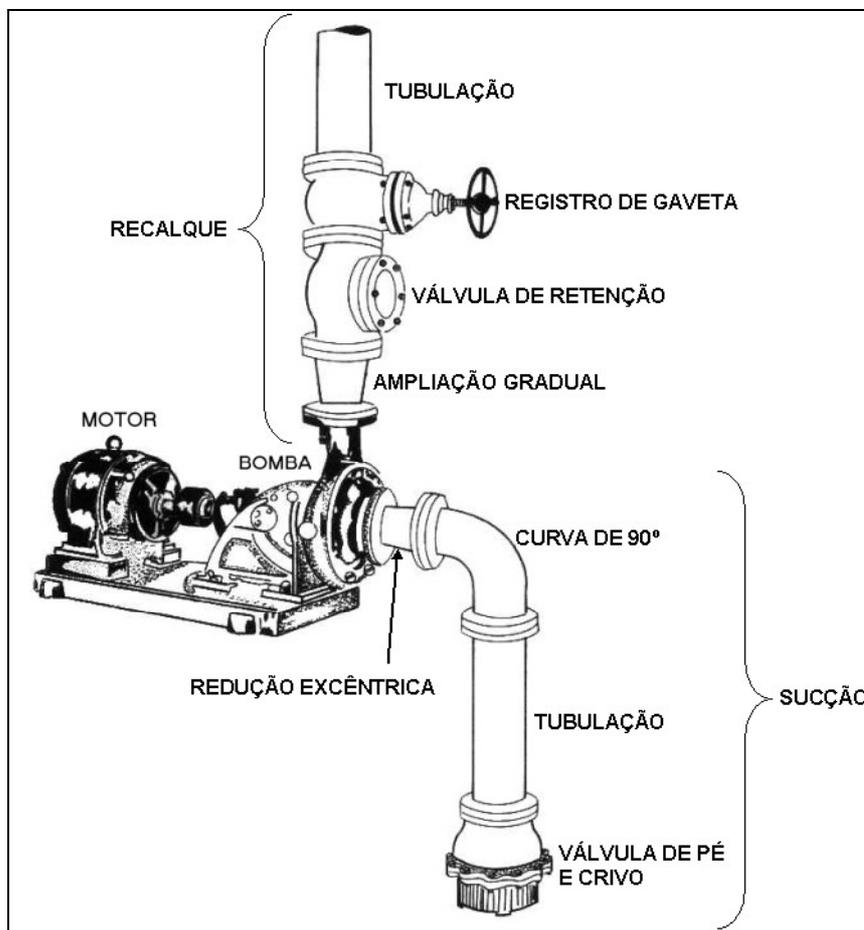


Figura 5.2 - Componentes típicos de uma estação de bombeamento.

### 5.3 Princípio de funcionamento das bombas centrífugas

O princípio de funcionamento das bombas centrífugas, pode ser descrito, de forma simplificada, como uma seqüência de etapas, como a seguir:

- a) estando a bomba escorvada, ou seja, previamente preenchida com água, as pás do rotor (palhetas) iniciam um movimento rotativo, impulsionando o líquido da parte central do rotor, devido à força centrífuga, em direção à periferia do mesmo, forçando o fluxo pela canalização de recalque;
- b) este deslocamento do líquido ocasiona o surgimento de uma zona de pressão negativa (sucção), na parte central do rotor;

- c) a pressão atmosférica, atuando sobre a superfície do líquido na fonte de suprimento, pressiona o mesmo, através da canalização de sucção, em direção à zona de pressão negativa, na parte central do rotor;
- d) o líquido proveniente da canalização de sucção chega à parte central do rotor ocupando o lugar daquele que sai pela canalização de recalque, mantendo assim uma condição de fluxo contínuo.

#### **5.4 Dimensionamento do conjunto moto-bomba**

Sendo conhecidos a vazão a ser elevada, a localização da fonte de suprimento da bomba e do ponto de saída da água, pode-se dizer que, para a irrigação, o dimensionamento do conjunto moto-bomba consiste na correta determinação das canalizações que devem ser utilizadas desde a sucção da bomba até o sistema de irrigação, bem como da bomba a ser utilizada e do motor necessário ao seu acionamento. De forma sintética, este procedimento envolve os seguintes passos:

- a) determinação do diâmetro a ser utilizado na sucção;
- b) determinação do diâmetro a ser utilizado no recalque;
- c) estimativa das perdas de carga na sucção e no recalque;
- d) estimativa da altura manométrica total;
- e) estimativa da potência do conjunto moto-bomba;
- f) escolha da bomba e do motor.

A seguir serão apresentadas, algumas das formas possíveis, para a execução da seqüência acima. As metodologias que serão descritas não esgotam o assunto, mas permitem que os profissionais envolvidos no dimensionamento de sistemas de irrigação projetem sistemas de elevação de água que atendam plenamente a demanda do sistema de irrigação, com níveis adequados de demanda de potência.

##### **5.4.1 Determinação do diâmetro das canalizações**

A escolha dos diâmetros das canalizações de sucção e de recalque afeta de forma direta, os custos de investimento e de operação das estações elevatórias. O

custo das tubulações aumenta à medida que aumenta o seu diâmetro, porém em maior proporção. Por este motivo, a utilização de tubulações de menores diâmetros, constitui uma prática comum na busca pela redução dos custos de investimento, em sistemas pressurizados. Por outro lado, a maior resistência à passagem da água, imposta por tubulações de menor diâmetro, pode requer um aumento na potência do conjunto moto-bomba, tornando mais altos os custos de operação do sistema.

O diâmetro recomendado, para as canalizações de um sistema de elevação de água, é aquele que minimiza a soma dos custos de investimento e operação do sistema, sem comprometer a segurança e a durabilidade do sistema. Este diâmetro é comumente denominado "diâmetro econômico". Na tentativa de estabelecer correlações pré-definidas entre o diâmetro das canalizações e os custos de investimento e operação, foram propostas algumas fórmulas para determinação do diâmetro das tubulações, entre as quais, pode-se citar:

#### 5.4.1.1 Fórmula de Bresse

Esta fórmula foi uma das primeiras a ser estabelecida, correlacionando o dimensionamento hidráulico das tubulações de recalque, de estações de bombeamento, com critérios econômicos, sendo ainda muito utilizada. A fórmula pode ser expressa como:

$$D = k \cdot \sqrt{Q} \quad (5.1)$$

em que: D = diâmetro da canalização, em metros;

k = coeficiente relativo aos custos de investimento e operação, adimensional;

Q = vazão, em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

O valor de k geralmente varia de 0,8 a 1,3 e depende de uma série de fatores, entre os quais, o tempo diário de funcionamento da bomba, embora existam recomendações para utilização da fórmula de Bresse apenas para sistemas que funcionem 24 horas por dia (GOMES, 2001). Quanto maior o número de horas de funcionamento, maior o valor de k. Para estações de recalque que funcionem 24 horas por dia, o valor de k se aproxima de 1,3. Entretanto, é comum a utilização do valor 1,0 por mera questão de simplicidade. A partir da equação da continuidade, o

valor de  $k$  pode ser correlacionado com a velocidade na tubulação, através da expressão:

$$k = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot V}} \quad (5.2)$$

em que:  $V$  = velocidade de escoamento da água, em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

#### 5.4.1.2 Fórmula da ABNT

Segundo a NBR 5626 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998), o diâmetro da canalização de recalque, para sistemas que trabalhem um determinado número de horas por dia, pode ser determinado pela expressão:

$$D = 0,587 \cdot T^{0,25} \cdot \sqrt{Q} \quad (5.3)$$

em que:  $T$  = jornada diária de funcionamento do sistema, em horas.

#### 5.4.1.3 Velocidades recomendadas

Velocidades muito elevadas nas linhas adutoras de irrigação podem causar problemas, como:

- a) elevada perda de pressão ao longo do sistema, devido ao atrito (perda de carga). As perdas de carga nas tubulações variam com a velocidade, de forma exponencial;
- b) risco de ocorrência de elevações abruptas de pressão (golpe de aríete ou sobrepressão hidráulica), nas interrupções bruscas (fechamento de válvulas, por exemplo) do fluxo, colocando em risco a integridade do equipamento;
- c) excesso de vibração nas tubulações, especialmente em curvas e derivações, aumentando os custos de manutenção e reduzindo a vida útil do sistema.

Por outro lado, velocidades muito baixas facilitam a deposição do material em suspensão que esteja sendo transportado pela água de irrigação. Este material pode ter origem na própria fonte de abastecimento utilizada, como pode ser resultado da adição de fertilizantes e outros produtos na água de irrigação.

Avaliando os fatores anteriormente citados, em conjunto com velocidades normalmente encontradas em dimensionamentos econômicos, é possível estabelecer recomendações para os limites de velocidade nas tubulações:

- a) velocidade na canalização de sucção: entre 0,5 e 1,5 m/s (não deve ultrapassar 2,0m/s);
- b) velocidade na canalização de recalque: entre 0,5 e 2,5m/s (não deve ultrapassar 3,0m/s).

Adotando-se uma velocidade, dentro dos limites recomendados, e aplicando a equação da continuidade, pode-se determinar o diâmetro das canalizações, através da seguinte equação (nas mesmas unidades já empregadas):

$$D = \sqrt{\frac{4.Q}{\pi.V}} \quad (5.4)$$

O diâmetro calculado pela equação acima dificilmente coincide com um diâmetro disponível no mercado, por este motivo, deve ser adotado o diâmetro comercial mais próximo, desde que a velocidade resultante permaneça dentro dos limites recomendados.

Uma prática mais adequada para a determinação dos diâmetros das canalizações, consiste na avaliação dos custos totais relacionados com algumas alternativas de diâmetros, tomando os diâmetros calculados por algum dos métodos acima descritos, como ponto de partida. Técnicas de otimização econômica, aplicadas à determinação dos diâmetros de tubulações, em sistemas de irrigação já foram testadas, com resultados satisfatórios (GOMES, 1997; MEDEIROS; GOMES, 1999).

#### **5.4.2 Estimativa das perdas de carga na sucção e no recalque**

Durante seu funcionamento, as bombas centrífugas transferem energia para o líquido, para que este possa se deslocar desde o ponto de captação até o ponto (ou pontos) de saída. Durante este deslocamento, parte da energia do líquido se dissipa, devido ao atrito. A parcela da energia que é dissipada durante o escoamento é denominada perda de carga.

As perdas de carga podem ser divididas em dois tipos:

- a) perdas distribuídas: são as perdas que ocorrem ao longo dos trechos retílineos da tubulação, sendo também denominadas de perdas ao longo da tubulação;
- b) perdas localizadas: são as perdas que ocorrem nas peças da canalização, como nos registros, válvulas, curvas, etc. Estas perdas também são conhecidas como perdas acidentais ou singulares.

Existem diversas equações para a estimativa destas perdas de carga. Neste texto serão apresentadas duas formas de estimativa das perdas distribuídas e uma única forma de estimativa das perdas localizadas.

Para todas as equações que serão apresentadas, considera-se que são conhecidas as seguintes características da instalação:

- a) material das canalizações;
- b) diâmetros das canalizações;
- c) vazão;
- d) comprimento das canalizações;
- e) peças existentes nas canalizações.

#### 5.4.2.1 Equação de Hazen-Williams

A equação de Hazen-Williams é utilizada para a estimativa da perda de carga distribuída, sendo uma das equações de uso mais generalizado, em função da grande variedade de materiais e da larga faixa de diâmetros de canalização, para os quais sua aplicação é adequada. Em termos de diâmetros, sua aplicação é recomendada para tubulações de 50mm a 3500mm de diâmetro, em regime turbulento (predominante em instalações de irrigação por aspersão).

A estimativa da perda de carga distribuída é feita através das equações abaixo:

$$J = 10,643 \cdot Q^{1,85} \cdot C^{-1,85} \cdot D^{-4,87} \quad (5.5)$$

$$hf_D = J \cdot L \quad (5.6)$$

onde:  $J$  = perda de carga unitária, em  $m \cdot m^{-1}$  (adimensional);  
 $C$  = coeficiente relativo ao material da tubulação, adimensional;  
 $hf_D$  = perda de carga distribuída, em m;

L = comprimento da tubulação, em m.

Os valores do coeficiente C podem ser encontrados na Tabela 5.1, a qual serve como um indicador dos tipos de material para os quais a equação de Hazen-Williams é adequada.

Tabela 5.1 – Valores do coeficiente C da expressão de Hazen-Williams (AZEVEDO NETO, 1998).

Material da tubulação	C
Aço corrugado (chapa ondulada)	60
Aço com juntas <i>lock-bar</i> , novos	130
Aço galvanizado (novos e em uso)	125
Aço rebitado, novos	110
Aço rebitado, em uso	85
Aço soldado, novos	120
Aço soldado, em uso	90
Aço soldado com revestimento especial, novos e em uso	130
Chumbo	130
Cimento-amianto	140
Cobre	130
Concreto, bom acabamento	130
Concreto, acabamento comum	120
Ferro fundido, novos	130
Ferro fundido, em uso (veja quadro detalhado)	90
Ferro fundido, tubos revestidos de cimento	130
Grés cerâmico vidrado (manilhas)	110
Latão	130
Madeira, em aduelas	120
Tijolos, condutos bem executados	100
Vidro	140
Plástico	140

#### 5.4.2.2 Fórmula Universal

A Fórmula Universal também é utilizada para a estimativa da perda de carga distribuída, mas seu uso, na forma como será apresentada, se restringe às tubulações lisas, como as de PVC, alumínio e polietileno, entre outras, em regime turbulento. O cálculo do fator de atrito (f) será feito através da equação de Kostiakov.

A estimativa da perda de carga distribuída é calculada através das equações abaixo:

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{5,62}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (5.7)$$

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \nu} \quad (5.8)$$

$$hf_D = \frac{8 \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot g} \quad (5.9)$$

em que:  $f$  = coeficiente de atrito, adimensional;

$\text{Re}$  = número de Reynolds, adimensional;

$\nu$  = viscosidade cinemática da água, em  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (valor para água a  $20^\circ\text{C} = 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$g$  = aceleração da gravidade, em  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  ( $9,81 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

Na forma apresentada, o uso da Fórmula Universal limita-se às situações em que o regime de escoamento é turbulento ( $\text{Re} \geq 4000$ ). Este é o regime predominante nas canalizações dos conjuntos de bombeamento de água, em sistemas de irrigação por aspersão.

#### 5.4.2.3 Estimativa das perdas localizadas

De forma geral, as perdas localizadas podem ser estimadas como um somatório das perdas que ocorrem em cada uma das peças que compõem a canalização, pela seguinte expressão:

$$hf_L = \sum K \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (5.10)$$

em que:  $hf_L$  = perda de carga localizada, em m;

$K$  = coeficiente relativo ao tipo de peça.

Os valores do coeficiente  $K$  podem ser encontrados na Tabela 5.2.

A velocidade da água na canalização pode ser calculada em função da vazão que escoar e do diâmetro da canalização, na forma que segue:

$$V = \frac{Q}{A_C} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (5.11)$$

onde:  $A_C$  = área da seção transversal da canalização, em  $\text{m}^2$ .

Tabela 5.2 – Valores aproximados de K (AZEVEDO NETO, 1998)

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30*	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor Venturini	2,50**
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,15*
Controlador de vazão	2,50	Registro de ângulo aberto	5,00
Cotovelo de 90°	0,90	Registro de gaveta aberto	0,20
Cotovelo de 45°	0,40	Registro de globo aberto	10,00
Crivo	0,75	Saída de canalização	1,00
Curva de 90°	0,40	Tê, passagem direta	0,60
Curva de 45°	0,20	Tê, saída de lado	1,30
Curva de 22 ½°	0,10	Tê, saída bilateral	1,80
Entrada normal em canalização	0,50	Válvula-de-pé	1,75
Entrada de borda	1,00	Válvula de retenção	2,50
Existência de pequena derivação	0,03	Velocidade	1,00

\* com base na velocidade maior (seção menor);

\*\* relativa à velocidade na canalização.

A perda de carga total, que ocorre em uma canalização, é igual à soma da perda de carga distribuída mais as perdas de carga localizadas. Assim, tem-se:

$$hf_T = hf_D + hf_L \quad (5.12)$$

em que:  $hf_T$  = perda de carga total, em m.

#### 5.4.3 Estimativa da altura manométrica total

A altura manométrica total corresponde à soma do desnível geométrico total entre a fonte de suprimento e o ponto mais alto de saída da água, mais todas as perdas de carga que ocorrem durante o escoamento, acrescida da maior pressão de serviço do sistema. Esta soma pode ser representada como:

$$H_{man} = H_{GS} + H_{GR} + hf_{DS} + hf_{DR} + hf_{LS} + hf_{LR} + PS \quad (5.13)$$

em que:  $H_{man}$  = altura manométrica total, em m;

$H_{GS}$  = altura geométrica de sucção, em m;

$H_{GR}$  = altura geométrica de recalque, em m;

$hf_{DS}$  = perda de carga distribuída na sucção, em m;

$hf_{DR}$  = perda de carga distribuída no recalque, em m;

$hf_{LS}$  = perda de carga localizada na sucção, em m;

$hf_{LR}$  = perda de carga localizada no recalque, em m;

PS = pressão de serviço máxima no sistema, em mca (metros de coluna de água).

A Figura 5.3 ilustra uma das diversas possibilidades de instalação de uma bomba centrífuga. Na figura é possível visualizar a altura geométrica de sucção, que representa o desnível entre a superfície da água na fonte de suprimento e o centro da bomba, bem como a altura geométrica de recalque, que representa o desnível entre o centro da bomba e o ponto de saída da água.

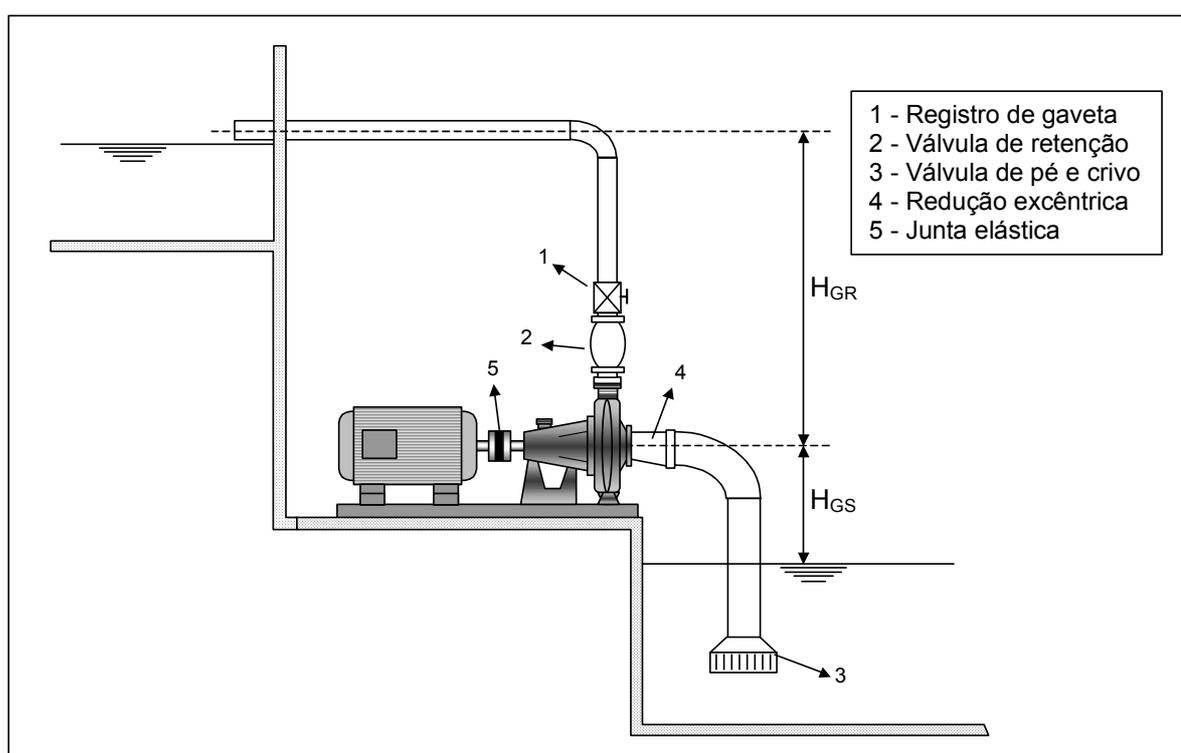


Figura 5.3 – Alturas geométricas de sucção e recalque em uma instalação de bombeamento.

#### 5.4.4 Estimativa da potência do conjunto moto-bomba

A potência necessária para o acionamento do conjunto moto-bomba, pode ser estimada pela seguinte expressão:

$$P_{CV} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{75 \cdot \eta} \quad (5.14)$$

em que:  $P_{CV}$  = potência do conjunto moto-bomba, em cv (cavalos vapor);

$\gamma$  = peso específico da água, em  $\text{kgf}\cdot\text{m}^{-3}$  (valor padrão para água  $1000\text{kgf}\cdot\text{m}^{-3}$ );

$\eta$  = rendimento global do conjunto moto-bomba, adimensional.

O rendimento global do conjunto moto-bomba pode ser calculado como:

$$\eta = \eta_B \cdot \eta_M \quad (5.15)$$

em que:  $\eta_B$  = rendimento da bomba, adimensional;

$\eta_M$  = rendimento do motor, adimensional.

Um conjunto moto-bomba, por exemplo, formado por uma bomba com rendimento de 0,7 (70%) e um motor com rendimento 0,85 (85%), terá um rendimento global de 0,595 (59,5%).

Qualquer que seja o motor que venha a ser escolhido, para acionamento da bomba, sempre deve ser prevista uma margem de folga para a sua potência. Nos motores elétricos, são geralmente adotadas as folgas indicadas na tabela abaixo:

Tabela 5.3 – Valores da folga para motores elétricos (DENICULI, 1993).

Potência consumida	Folga (%)
até 2 cv	50
de 2 a 5 cv	30
de 5 a 10 cv	20
de 10 a 20 cv	15
acima de 20 cv	10

Independentemente da potência calculada, para motores a diesel, é recomendada uma folga de 25%, enquanto que, para os motores a gasolina esta folga deve ser de 50%.

#### 5.4.5 Escolha da bomba e do motor

Após terem sido realizados os cálculos descritos, é possível fazer a escolha da bomba e do motor que serão utilizados.

Para a escolha da bomba, a vazão a ser elevada e a altura manométrica total, são as duas principais especificações que devem ser consideradas. De posse destas informações, deve-se buscar, entre os modelos disponíveis, aquele que atenda estas especificações, com o maior rendimento e com o menor custo total.

Para a escolha do motor, fatores como a disponibilidade de energia no local de instalação, a rotação de funcionamento da bomba e a potência (já incluída a folga) são as principais características a serem consideradas. Na Tabela 5.4 estão listadas as potências comerciais, para motores elétricos até 350CV, disponíveis com maior frequência.

Tabela 5.4 – Potências de motores elétricos disponíveis com maior frequência no Brasil.

Potência (cv)*					
1/4	1 1/2	7 1/2	25	50	150
1/3	2	10	30	60	200
1/2	3	12	35	75	250
3/4	5	15	40	100	300
1	6	20	45	125	350

\* 1 cv = 0,7355 kW = 0,9863 hp

#### 5.4.6 Máxima altura geométrica de sucção

Quando a pressão da água, na entrada do rotor das bombas centrífugas, é excessivamente baixa, surge o fenômeno da "cavitação", o qual pode ser descrito como a seguinte série de etapas:

- se, na entrada do rotor, a pressão for insuficiente para manter a água em estado líquido, ocorre a formação de bolhas de vapor de água, no interior da massa líquida;
- no interior da bomba, as bolhas de vapor de água alteram o comportamento hidrodinâmico da massa líquida, causando redução no rendimento da bomba;
- ao passar pelo rotor, a massa líquida é sujeita a um aumento abrupto da pressão, fazendo com que as bolhas de vapor de água voltem ao estado líquido;
- este retorno brusco de porções de água ao estado líquido, em contato com a superfície do rotor, gera pontos de elevado esforço de tração, junto às paredes do rotor, causando o seu desgaste.

A ocorrência de cavitação, causa a queda de rendimento da bomba, além de reduzir a vida útil de seus componentes, em função dos esforços e vibrações a que são submetidos.

Cada bomba, possui um valor próprio de pressão mínima necessária, na entrada do rotor, para que não ocorra a cavitação. Esta informação é denominada NPSH requerido (Net Positive Suction Head).

Para garantir que não ocorra cavitação, em uma determinada instalação, é necessário que o NPSH disponível no local seja superior ao NPSH requerido pela bomba. O NPSH disponível pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\text{NPSH}_D = H_{\text{ATM}} - H_{\text{GS}} - H_V - hf_{\text{TS}} \quad (5.16)$$

em que:  $\text{NPSH}_D$  = NPSH disponível no local, em m;

$H_{\text{ATM}}$  = pressão atmosférica, em mca;

$H_V$  = pressão de vapor, em mca;

$hf_{\text{TS}}$  = perda de carga total na sucção, em m.

Na Tabela 5.5 são apresentados os valores da pressão atmosférica em função da altitude do local, enquanto na Tabela 5.6 são apresentados os valores da pressão de vapor em função da temperatura.

Tabela 5.5 – Valores da pressão atmosférica em função da altitude (LENCASTRE, 1972).

Altitude (m)	Pressão atmosférica (mca)	Altitude (m)	Pressão atmosférica (mca)
0	10,33	1820	8,29
340	9,92	2240	7,88
690	9,52	2680	7,48
1045	9,11	3140	7,07
1420	8,70		

Tabela 5.6 – Valores da pressão de vapor em função da temperatura (LENCASTRE, 1972).

Temperatura (°C)	Pressão de vapor (mca)	Temperatura (°C)	Pressão de vapor (mca)
2	0,072	25	0,323
4	0,083	30	0,433
6	0,095	40	0,752
8	0,109	50	1,258
10	0,125	60	2,031
15	0,174	80	4,827
20	0,238	100	10,33

Os valores das variáveis que determinam o NPSH disponível, permitem verificar que o fator sobre o qual o projetista pode exercer maior influência, é a altura geométrica de sucção. Assim sendo, pode-se estabelecer uma relação que permita definir, em função do NPSH requerido pela bomba e das condições locais, um valor máximo para a altura de sucção da bomba. Esta relação pode ser escrita como:

$$H_{GS} \leq H_{ATM} - NPSH_R - H_V - hf_{TS} \quad (5.17)$$

onde:  $NPSH_R$  = NPSH requerido pela bomba, em m.

Parte dos fabricantes de bombas informam o valor do  $NPSH_R$  de seus produtos, nos respectivos catálogos técnicos. Outros, entretanto, fornecem apenas um valor de altura máxima de sucção, geralmente estabelecida para localidades de maior altitude.

## **5.5 Instalação, operação e manutenção de bombas**

Além da correta especificação do conjunto moto-bomba, outros cuidados devem ser tomados para garantir o correto funcionamento de um conjunto elevatório. Estes cuidados incluem a correta instalação e operação do conjunto, de acordo com as características do sistema escolhido e com as recomendações do fabricante.

A manutenção preventiva periódica do equipamento é fundamental para prolongar sua vida útil e garantir a plena realização do trabalho desejado.

A seguir são apresentadas, de forma resumida, algumas recomendações em relação a vários aspectos que devem ser considerados ao se lidar com bombas centrífugas.

### **5.5.1 Recebimento**

Ao receber o equipamento, deverão ser verificadas as especificações constantes nas plaquetas de identificação, tanto da bomba como do motor. Deve-se garantir que o equipamento seja acompanhado dos desenhos que irão auxiliar no processo de montagem. O equipamento também deve ser acompanhado pelos manuais de instalação, operação e manutenção.

### **5.5.2 Local de instalação**

Ao definir e preparar o local de instalação do conjunto moto-bomba, deve-se considerar o acesso para operação do sistema, bem como para a execução de reparos e de atividades periódicas de manutenção. O local deve ser bem ventilado, seco e protegido das intempéries. A proximidade da fonte de suprimento e da rede de energia também são fundamentais. É preciso levar em consideração que, no caso de uma pane, pode ser preciso remover rapidamente o equipamento para outro local, seja para execução de reparos, seja para a substituição do equipamento.

### **5.5.3 Assentamento**

O conjunto moto-bomba deverá ser assentado sobre uma base firme, que garanta a permanência do equipamento na posição adequada, com capacidade para absorver eventuais vibrações, bem como resistir a batidas e outros eventos acidentais. A montagem sobre bases de concreto, devidamente executada, sobre terreno firme, é a mais indicada.

### **5.5.4 Alinhamento**

O alinhamento entre a bomba e o motor deve ser sempre verificado, mesmo quando o conjunto já vem montado pelo distribuidor. Os problemas de alinhamento incluem: o afastamento excessivo entre as duas partes da luva ou junta elástica, o desencontro entre o eixo da bomba e do motor, e o desalinhamento angular entre os mesmos. Para verificar o alinhamento, coloca-se uma régua nas faces cilíndricas das duas metades da luva elástica, assim, o alinhamento estará adequado quando a régua tocar as metades da luva por igual. Este procedimento é ilustrado na Figura 5.4. Deverá também ser medida a distância entre as faces opostas das duas partes da luva elástica, que devem ser iguais em toda a circunferência. A luva elástica não deve ser usada para compensar o desalinhamento entre a bomba e o motor, pois sua real função é compensar a dilatação, devido a mudança de temperatura, bem como para diminuir o golpe na partida e parada do motor.

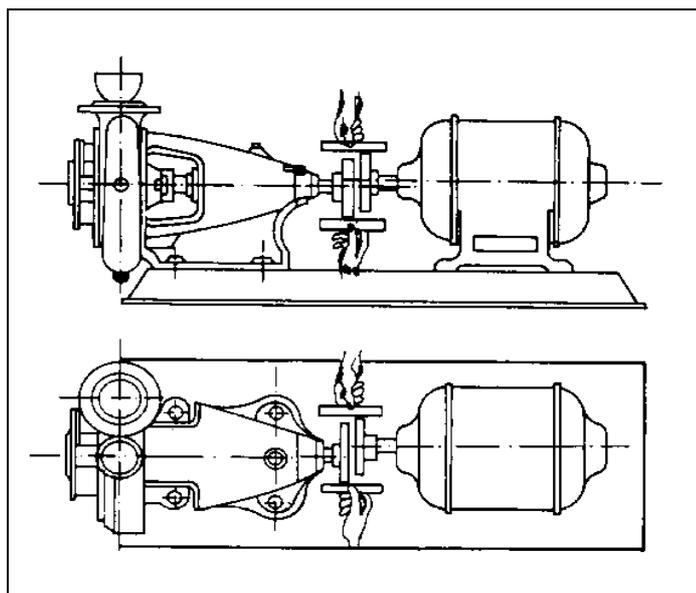


Figura 5.4 – Procedimento de alinhamento dos eixos da bomba e do motor.

### 5.5.5 Tubulações

A fim de reduzir as perdas de carga, as canalizações devem ser tão curtas quanto possível e com o menor número de peças especiais. As curvas deverão ser de raio longo e as reduções e ampliações devem ser graduais.

O peso das canalizações não deve ser suportado pela bomba e sim escorado por estruturas independentes, de tal maneira que, quando os parafusos dos flanges forem apertados, nenhuma tensão seja exercida sobre a carcaça da bomba.

#### 5.5.5.1 Tubulação de sucção

O acúmulo de ar no interior da canalização de sucção, deve ser evitado, pois pode provocar a diminuição do rendimento do equipamento ou causar a perda do escorvamento, com conseqüente interrupção do funcionamento. Assim sendo, recomenda-se:

- a) instalação da tubulação de sucção sempre em auge, da fonte de suprimento ao bocal de sucção (em instalações não afogadas);
- b) quando houver necessidade de uso de reduções, utilizar reduções excêntricas;

- c) evitar a agitação do líquido, com formação de bolhas de ar ao redor da entrada da tubulação de sucção;
- d) se mais de uma bomba funcionar no mesmo poço de sucção, devem ser utilizadas canalizações de sucção independentes, com barreiras físicas que evitem a influência da sucção de uma bomba sobre outra;
- e) a extremidade da canalização de sucção deverá ficar a uma profundidade, abaixo do nível mínimo da água, suficiente para impedir a formação de vórtice e a aspiração de ar pela tubulação.

#### **5.5.5.2 Válvula de pé**

Em bombas que não estejam trabalhando afogadas, o uso de válvula de pé é fundamental, para a mantê-las escorvadas, quando não estiverem em funcionamento. Estas válvulas devem ser associadas a filtros do tipo crivo, evitando a entrada de material que possa obstruir a passagem da água pelo rotor, ou mesmo danificá-lo. Esta medida é fundamental em sistemas de irrigação automatizados, para impedir o funcionamento da bomba a seco.

#### **5.5.5.3 Tubulação de recalque**

Após a saída da bomba, deve-se instalar uma válvula de retenção. Esta válvula protege a bomba contra a sobrepressão hidráulica, gerada pelo golpe de aríete, que ocorre quando o sistema sofre algum tipo de parada brusca, como nas eventuais falhas de fornecimento de energia, por exemplo. Além disso, esta válvula auxilia a manter a bomba escorvada, evitando o refluxo de água. O uso desta válvula pode ser considerado indispensável, para alturas de recalque superiores a 15m.

Após a válvula de retenção, deve ser instalado um registro de gaveta, que servirá para efetuar o controle da vazão e da pressão do sistema, bem como para facilitar as operações de manutenção da bomba e da válvula de retenção.

#### **5.5.6 Motor elétrico**

Variações de frequência inferiores a 5%, não impedem o funcionamento satisfatório dos motores elétricos. Entretanto, se além da variação de frequência,

ocorrer também variação de tensão, a soma destas variações não deve ultrapassar 10%.

### **5.5.7 Gaxetas**

Gaxetas são anéis de vedação feitos de material facilmente moldável e plástico, porém resistente ao atrito e ao calor. A vedação é proporcionada pelas gaxetas a partir do momento em que são comprimidas por uma peça denominada "preme-gaxetas" (ou aperta-gaxetas), forçando sua compressão contra o eixo da bomba. A lubrificação e refrigeração das gaxetas é proporcionada pela própria água que está sendo bombeada. Por este motivo, o preme-gaxetas não deve ser apertado em excesso, pois é normal e desejável a ocorrência de um pequeno gotejamento do líquido, junto à gaxeta.

### **5.5.8 Partida e parada do conjunto moto-bomba**

A seqüência de passos para partida e parada das bombas centrífugas varia em função do tipo de bomba que está sendo utilizada. Entretanto, em todos os casos, o objetivo principal é a redução da potência de partida. Nas bombas centrífugas propriamente ditas (radiais), a potência consumida aumenta com a vazão. Por este motivo, a partida destas bombas deve ser efetuada com o registro de recalque fechado, o que garante o mínimo valor de potência de partida.

De forma sintética, o procedimento de partida para as bombas centrífugas radiais deve ser:

- a) escorvar a bomba;
- b) garantir que o registro do recalque esteja fechado;
- c) ligar o motor;
- d) abrir lentamente o registro de recalque, até atingir a vazão e a pressão desejados;
- e) verificar se o gotejamento das gaxetas está adequado e corrigir o ajuste do preme-gaxeta, se necessário;
- f) verificar se não existem ruídos ou vibrações fora do normal.

Para a parada do sistema, basta proceder na forma inversa, ou seja, fechar lentamente o registro do recalque, para após desligar o motor.

### 5.5.9 Variação das condições de funcionamento

É possível alterar as características de funcionamento das bombas centrífugas, como vazão, altura manométrica máxima e potência absorvida, mediante pequenas alterações na sua rotação ou no diâmetro do rotor.

#### 5.5.9.1 Variação da rotação

Alterando a rotação da bomba, é possível alterar suas características de vazão, altura manométrica e potência consumida. Entretanto, para que não ocorram alterações significativas no rendimento, é recomendado que estas alterações de rotação não ultrapassem a faixa de 30 a 40%.

O efeito da alteração da rotação, sobre as características mencionadas, pode ser estimado a partir das seguintes equações:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (5.18)$$

$$\frac{H_{\text{man1}}}{H_{\text{man2}}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (5.19)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (5.20)$$

Sendo que,  $Q_1$ ,  $H_{\text{man1}}$ ,  $P_1$  e  $n_1$  são, respectivamente, a vazão, a altura manométrica, a potência consumida e a rotação originais da bomba e,  $Q_2$ ,  $H_{\text{man2}}$ ,  $P_2$  e  $n_2$  são, respectivamente, a vazão, a altura manométrica, a potência consumida e a rotação, após a alteração da rotação.

Esta característica permite, por exemplo, aumentar a capacidade de vazão de uma bomba pela utilização de um jogo de polias. Deve-se atentar para o maior aumento da potência absorvida que esta alteração produz.

#### 5.5.9.2 Variação do diâmetro do rotor

Outra forma de alterar as características de funcionamento de uma bomba centrífuga, é através da redução do diâmetro do rotor por meio de usinagem. Em geral, é recomendado que esta redução não ultrapasse a 20% do diâmetro original.

Entretanto, tal recomendação não se aplica de forma indiscriminada para todos os casos.

O efeito da redução do diâmetro do rotor, sobre as características mencionadas, pode ser estimado a partir das seguintes equações:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{dr_1}{dr_2} \quad (5.21)$$

$$\frac{H_{\text{man1}}}{H_{\text{man2}}} = \left( \frac{dr_1}{dr_2} \right)^2 \quad (5.22)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{dr_1}{dr_2} \right)^3 \quad (5.23)$$

Sendo que,  $Q_1$ ,  $H_{\text{man1}}$ ,  $P_1$  e  $dr_1$  são, respectivamente, a vazão, a altura manométrica, a potência consumida e o diâmetro do rotor originais da bomba e,  $Q_2$ ,  $H_{\text{man2}}$ ,  $P_2$  e  $dr_2$  são, respectivamente, a vazão, a altura manométrica, a potência consumida e o diâmetro do rotor, após a usinagem do mesmo.

Em geral, esta alteração é feita quando existe disponibilidade de uma bomba que, em seu estado original, produz vazões e alturas manométricas acima da demanda existente. A redução do diâmetro do rotor poderia possibilitar a utilização de um motor de menor potência, causando uma redução no consumo de energia.

## 6 Exemplo de aplicação

Para exemplificar alguns dos principais aspectos abordados, relativos ao planejamento e dimensionamento da irrigação, apresenta-se a seguir um exemplo de aplicação, direcionado para a cultura do milho.

Considerem-se as seguintes informações sobre a área a ser irrigada e a cultura no período de maior demanda:

Dimensões da área: 1.125 m x 1.150 m (129,38 ha)

Declividade média da área: 6%

Classificação do solo: Latossolo Vermelho distrófico típico

Tabela 6.1 – Valores da umidade volumétrica correspondentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, e da densidade relativa do solo, para as camadas de 0 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm.

	Profundidade		
	0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
$\theta_{CC}$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	0,37	0,39	0,40
$\theta_{PMP}$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	0,26	0,26	0,28
$d_s$	1,18	1,22	1,23

Profundidade efetiva do sistema radicular: 60 cm

Altura das plantas: 2,20 m

Com os dados acima, é possível estimar a capacidade de água disponível para cada faixa de profundidade, sendo a CAD total obtida pela soma das mesmas. Os valores da CAD são apresentados na Tabela 6.2 e foram obtidos pela equação 2.5:

$$CAD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot Z_e$$

Tabela 6.2 – Valores da capacidade de armazenamento de água no solo, para as camadas de 0 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm e valor total para a camada de 0 a 60 cm.

<b>Profundidade (cm)</b>	<b>CAD (mm)</b>
0 – 20	22
20 – 40	26
40 – 60	24
<b>Total</b>	<b>72</b>

Caso fosse estabelecido um sistema de manejo com lâmina de irrigação fixa, ou seja, com frequência de irrigação variável, a lâmina líquida de irrigação poderia ser determinada pela equação 2.9. Admitindo um déficit de manejo tolerável igual a 50% a lâmina líquida seria de 36 mm, como segue:

$$L_L = \text{DTM} \cdot \text{CAD} = 0,5 \cdot 72 = 36 \text{ mm}$$

Assumindo o período da floração, compreendido entre o pendoamento e o espigamento, como o período crítico em relação à disponibilidade hídrica, por ser o que apresenta o maior consumo de água e pela importância para a formação das sementes, deve-se estimar a demanda de água para o referido período. Para tanto, é necessário conhecer a duração dos diferentes estádios de desenvolvimento da cultivar e a data da semeadura.

O planejamento pode ser estabelecido para atender a demanda, no caso de não ocorrer precipitação significativa, durante todo o período crítico.

Considerando uma série histórica de valores máximos da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), durante o período crítico, é possível determinar o valor com 80% de probabilidade de ocorrência.

No caso da  $ET_0$  com 80% de probabilidade de ocorrência ser de 6,0 mm/dia e assumindo um coeficiente de cultivo igual a 1,1 a evapotranspiração da cultura, pela equação 2.39, atinge o valor de 6,6 mm/dia.

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 = 1,1 \cdot 6,0 = 6,6 \text{ mm / dia}$$

As características de solo, topografia e tamanho da área, indicam que um sistema de irrigação do tipo pivô central fixo poderia ser uma alternativa viável para a irrigação da cultura. Assim sendo, os passos a seguir serão direcionados para esta alternativa.

Adotando uma eficiência de aplicação de 85% para o sistema, a determinação da lâmina bruta a ser aplicada pode ser feita pela equação 2.14, na forma:

$$L_B = \frac{L_L}{E_a} = \frac{6,6}{0,85} = 7,8 \text{ mm / dia}$$

Para ilustrar uma possibilidade de dimensionamento para o sistema, a seguir será apresentado um conjunto de características para um pivô que poderia ser utilizado nesta situação. As características utilizadas são baseadas em modelos disponíveis no mercado, considerando os dados de cultura, lâmina bruta, tamanho e declividade da área irrigada.

Tabela 6.3 – Caracterização de um modelo de pivô, que poderia ser utilizado na situação analisada.

Material das tubulações	aço zincado
Altura livre no vão	2,50 m
Velocidade máxima da última torre (regulagem de 100% no percentímetro)	240 m/h
Comprimento do vão inicial	41,14 m
Comprimento da 2ª até a 5ª torre (4 vãos)	164,56 m
Comprimento da 5ª até a 8ª torre (3 vãos)	143,55 m
Comprimento da 8ª até a 11ª torre (3vãos)	183,78 m
Comprimento do balanço	26,82 m
Comprimento total	559,85 m
Diâmetro das tubulações até a 5ª torre	10" (254 mm)
Diâmetro das tubulações até a 8ª torre	8" (203,2 mm)
Diâmetro das tubulações até o final do balanço	6-5/8" (168,3 mm)
Pressão de serviço dos aspersores no final da linha	20 mca
Número de saídas para os aspersores	246
Diâmetro de cobertura dos últimos aspersores	12 m
Aspersores com válvula reguladora de pressão	

A área irrigada por um pivô, com estas características é calculada pela equação 4.1:

$$A_{MP} = \frac{\pi \cdot R^2}{10.000} = \frac{\pi \cdot 559,85^2}{10.000} = 98,47 \text{ ha}$$

Com estas dimensões, o diâmetro da área irrigada (1.119,7 m) cobre 99,53% da largura da área disponível, mas por não irrigar os cantos da parcela, restarão 30,91 ha sem cobertura.

Considerando a realização de irrigações diárias, o volume de água que deve ser aplicado, em cada irrigação, pode ser determinado pela equação 3.9:

$$\text{Vol} = 10 \cdot L_B \cdot A = 10 \cdot 7,8 \cdot 98,47 = 7.680,66 \text{ m}^3$$

Se for determinada uma jornada diária de irrigação de 21 horas, deixando três horas livres para não irrigar nos horários de pico de demanda por eletricidade, quando as tarifas são mais caras, a vazão necessária pode ser determinada com base na equação 3.8:

$$Q = \frac{\text{Vol}}{T_i} = \frac{7680,66}{21} = 365,75 \text{ m}^3 / \text{h}$$

O tempo necessário para o pivô completar uma volta pode ser determinado por:

$$T_V = \frac{L_V}{V_{UT}} \quad (6.1)$$

em que:  $T_V$  = tempo necessário para uma volta do pivô, em h;

$L_V$  = distância percorrida pela última torre em uma volta, em m;

$V_{UT}$  = velocidade da última torre, em  $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ .

A última torre está a uma distância de 533,03 m do centro do pivô, percorrendo uma distância de 3.349,13 m a cada volta completa do sistema. A uma velocidade de 240 m/h, o tempo para completar uma volta será:

$$T_V = \frac{L_V}{V_{UT}} = \frac{3.349,13}{240} = 13,95 \text{ h}$$

A lâmina bruta aplicada pelo pivô em uma volta, em sua velocidade máxima, pode ser determinada por:

$$L_{BVM} = \frac{Q \cdot T_V}{10 \cdot A_{MP}} \quad (6.2)$$

em que:  $L_{BVM}$  = lâmina bruta aplicada pelo pivô na velocidade máxima, em mm.

Utilizando a vazão máxima do sistema e 100% de velocidade na última torre, a lâmina aplicada será dada por:

$$L_{BVM} = \frac{Q \cdot T_V}{10 \cdot A_{MP}} = \frac{365,75 \cdot 13,95}{10 \cdot 98,47} = 5,18 \text{ mm}$$

Se o regulador de velocidade (percentímetro) for colocado na posição 100%, o tempo de oportunidade de irrigação será muito baixo, resultando em uma lâmina bruta aplicada insuficiente. O quociente entre a lâmina aplicada, com velocidade máxima na última torre, e a lâmina desejada, fornece o fator de ajuste da velocidade, na forma:

$$F_{AV} = \frac{L_{BVM}}{L_B} \cdot 100 \quad (6.3)$$

em que:  $F_{AV}$  = fator de ajuste da velocidade, em %.

Neste caso, o fator de ajuste da velocidade resulta em:

$$F_{AV} = \frac{L_{BVM}}{L_B} \cdot 100 = \frac{5,18}{7,8} \cdot 100 = 66,4\%$$

Isto significa que para aplicar a lâmina desejada o regulador de velocidade precisa ser ajustado para 66,4% da velocidade máxima, ou seja, aproximadamente 160 m/h. Com esta velocidade o tempo necessário para completar uma volta será:

$$T_V = \frac{L_V}{V_{UT}} = \frac{3.349,13}{160} = 20,93 \text{ h}$$

Conferindo a lâmina bruta aplicada, com esta regulagem, obtém-se um valor muito próximo à lâmina bruta estabelecida:

$$L_B = \frac{Q \cdot T_V}{10 \cdot A_{MP}} = \frac{365,75 \cdot 20,93}{10 \cdot 98,47} = 7,77 \text{ mm} \quad (6.4)$$

Para a determinação da potência do conjunto moto-bomba requerida para acionar o sistema, é necessário recorrer a outros dados sobre a topografia da área e localização do pivô e do conjunto moto-bomba. Estas informações são apresentadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Informações relevantes para a determinação da potência do conjunto moto-bomba.

Diferença de cota entre o centro do pivô e o ponto mais alto da área irrigada	19 m
Diferença de cota entre o centro do pivô e o ponto mais baixo da área irrigada	20 m
Comprimento da linha adutora subterrânea	610 m
Diferença de cota entre a moto-bomba e o centro do pivô	39,0 m
Altura de sucção da bomba	3,0 m

A perda de carga na tubulação do pivô deve ser determinada considerando, para cada trecho, separadamente, a vazão, o diâmetro, o comprimento e o número de saídas, podendo ser estimada pelas equações 5.5 e 6.5:

$$J = 10,643 \cdot Q^{1,85} \cdot C^{-1,85} \cdot D^{-4,87}$$

$$hf_D = J \cdot L \cdot F_C \quad (6.5)$$

em que:  $F_C$  = coeficiente de Christiansen para ajuste da perda de carga distribuída, para tubulações com múltiplas saídas de água, adimensional.

Para tubulações com saídas eqüidistantes, incluindo a distância até a primeira saída, o valor de  $F_C$  pode ser determinado da seguinte forma:

$$F_C = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2 \cdot N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6 \cdot N^2} \quad (6.6)$$

em que:  $m$  = coeficiente que varia em função da fórmula utilizada para cálculo da perda de carga (para Hazen-Williams,  $m = 1,85$ );

$N$  = número de pontos de redução de vazão na tubulação.

Aplicando as equações, obtém-se uma perda de carga distribuída de aproximadamente 6,6 m.

O diâmetro da tubulação adutora pode ser estabelecido com base em um valor recomendado para a velocidade da água, por exemplo, 1,5 m/s. Dessa forma, o diâmetro obtido através da equação 5.4 é:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1016}{\pi \cdot 1,5}} = 0,294 \text{ m}$$

Para tubulações de aço zincado, o diâmetro a ser adotado será 304,8 mm. Pela equação de Hazen-Williams, a perda de carga distribuída nesta tubulação atingiria 4,01 m.

A perda de carga localizada pode, de forma simplificada, ser considerada como 5% das perdas distribuídas na tubulação do pivô e na adutora. Isto representa aproximadamente 0,53 m.

A altura manométrica total pode então ser determinada pela soma dos valores apresentados na Tabela 6.5:

Tabela 6.5 – Componentes da altura manométrica total.

Pressão no final da tubulação do pivô	20,00 m
Diferença de cota entre o centro do pivô e o ponto mais alto da área irrigada	19,00 m
Altura dos aspersores	2,50 m
Perda de carga na tubulação do pivô	6,60 m
Perda de carga na linha adutora	4,01 m
Perdas localizadas	0,53 m
Diferença de cota entre a moto-bomba e o centro do pivô	39,00 m
Altura de sucção da bomba	3,00 m

Dessa forma, a altura manométrica total será de 94,64 m.

Tendo sido determinados os valores de vazão e altura manométrica para o conjunto moto-bomba, é possível estimar a potência necessária para seu acionamento. Utilizando valores comuns para o rendimento da bomba e do motor elétrico, como por exemplo, 70 e 85%, respectivamente, a potência pode ser estimada pela equação 5.14:

$$P_{cv} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{75 \cdot \eta} = \frac{1000 \cdot 0,1016 \cdot 94,64}{75 \cdot 0,70 \cdot 0,85} = 215,47 \text{ cv}$$

Adicionando uma folga de 10% a potência atinge 237 cv. Considerando as potências dos motores elétricos disponíveis no mercado, seria necessário um motor de 250 cv (183,9 kW) para acionamento do sistema.

Uma estimativa do custo mensal com energia elétrica, apenas para acionamento do sistema de bombeamento, pode ser feita com base nos valores cobrados por demanda, em kW e pelo consumo de energia em kWh. Se, por

exemplo, a concessionária cobrar R\$6,993 por kW de demanda instalada e R\$0,117 por kWh de consumo, em 30 dias o custo total seria de:

Para demanda:  $183,9 \text{ kW} \cdot \text{R}\$6,993 / \text{kW} = \text{R}\$1.286,01$

Para consumo:  $183,9 \text{ kW} \cdot 21 \text{ horas / dia} \cdot 30 \text{ dias} \cdot \text{R}\$0,117 / \text{kWh} = \text{R}\$13.555,26$

**O custo total mensal da energia seria de R\$14.841,27, sem incluir as alíquotas de ICMS e de PIS/COFINS, nem eventuais descontos, o que representa um custo unitário de R\$0,64 por milímetro de água aplicada, por hectare, em cada irrigação** através do pivô. Para sistemas com acionamento diesel os custos seriam ainda maiores. Estes valores demonstram a importância do correto planejamento e dimensionamento dos sistemas de irrigação, como forma de garantir a competitividade da produção.

## **7 Considerações finais**

No que diz respeito ao sistema de produção de sementes de alta qualidade, a irrigação desempenha um importante papel em duas etapas bem distintas. A primeira etapa corresponde ao processo de obtenção e multiplicação de sementes, onde se busca produzir quantidades adequadas, minimizando os fatores que possam causar a perda do potencial genético ou que representem risco de não atendimento à demanda pelo produto. Nesta etapa, os objetivos da irrigação incluem evitar a ocorrência de stress hídrico, especialmente nas fases críticas para o desenvolvimento da semente e manter o conteúdo de água no solo nas condições mais favoráveis para a obtenção de um elevado rendimento de sementes de alta qualidade.

A segunda etapa corresponde ao emprego da irrigação, pelos usuários das sementes na produção de grãos. Esta etapa não está dentro do sistema de produção propriamente dito, mas tem efeitos sobre o mesmo. A semente é considerada o meio através do qual todo o potencial genético de uma cultivar com características superiores chega até o agricultor. Entretanto, se a semente não encontrar as condições adequadas ao seu desenvolvimento, sua qualidade não poderá ser plenamente comprovada.

A irrigação pode ser considerada um conjunto de técnicas de fornecimento de água às culturas, que visa garantir ou aumentar a produção, com eficiência técnica e econômica. A escolha do método de irrigação mais adequado, o correto dimensionamento dos sistemas de elevação, condução e aplicação de água e o estabelecimento de um sistema de manejo da água eficiente, são requisitos indispensáveis para que a irrigação atenda às expectativas que geralmente incentivam sua adoção. O não atendimento destes requisitos pode comprometer

seriamente o valor agronômico de uma cultivar, afetando negativamente características como:

- a) potencial de rendimento: falhas na determinação da capacidade de armazenamento de água do solo ou da real necessidade hídrica das plantas podem prejudicar o rendimento das culturas, seja pela colocação excessiva de água, seja pela insuficiência da água aplicada;
- b) resistência a doenças e insetos: a colocação de quantidades excessivas de água e a escolha de momentos inadequados para realizar a irrigação, podem favorecer a incidência de pragas e doenças, principalmente de origem fúngica;
- c) resistência a fatores ambientais adversos: a manutenção de níveis elevados de umidade do solo, nos momentos que antecedem a ocorrência de períodos chuvosos, potencializa o efeito negativo destes períodos;
- d) qualidade de seus produtos: a deficiência de água, bem como o excesso, em fases específicas da planta podem afetar características como germinação e vigor;
- e) resposta a insumos: a irrigação mal planejada e executada pode resultar em um mal aproveitamento dos insumos, reduzindo o aproveitamento dos produtos e resultando em perdas de produtividade e qualidade;
- f) duração do ciclo: a falta de uniformidade na aplicação de água pode provocar o desenvolvimento desuniforme da cultura, tanto em termos de maturidade fisiológica, como em termos de tamanho das sementes.

Em relação aos atributos físicos o planejamento e o manejo da irrigação devem buscar a minimização da suscetibilidade à ocorrência de danos mecânicos. Variações acentuadas no volume das sementes, por exemplo, causadas por variações na umidade, podem causar danos ao tegumento.

Em termos sanitários, os sistemas de irrigação podem ser utilizados para a aplicação mais uniforme e econômica de defensivos. Entretanto, deve ser considerado o potencial para a disseminação de doenças, seja pela contaminação

na própria fonte de suprimento, seja pelo transporte de estruturas de propagação pela água na superfície do solo ou ainda pelos respingos de água na superfície das folhas de plantas contaminadas.

Outro aspecto, de grande importância no planejamento e manejo da irrigação em áreas de multiplicação de sementes, é o fato de que esta difere daquela praticada com o objetivo de produzir grãos. Na produção de grãos, a irrigação visa maximizar a produção em termos de peso. Na produção de sementes, o aspecto qualitativo tem prioridade. Esta questão é ainda mais relevante, quando se lida com situações de suprimento restrito de água, em que devem ser estabelecidas estratégias de irrigação, nas quais a alta produtividade algumas vezes deve ser sacrificada, em favor da obtenção de sementes de alta qualidade.

Além dos aspectos de solo, clima e planta mencionados, o sucesso do uso da irrigação na produção de sementes, também envolve as questões de viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental, o que implica na necessidade de minimizar o consumo de energia e preservar a água e o solo.

A eficiência do programa brasileiro de sementes depende do correto funcionamento de cada um de seus componentes. Cientes deste fato, as entidades deste setor têm fomentado a capacitação de pessoal e a maior profissionalização de todas as etapas envolvidas. A irrigação possui um importante papel em algumas destas etapas, sendo que seus benefícios somente poderão ser plenamente alcançados, mediante o aperfeiçoamento da base de conhecimentos específicos para o setor, em conjunto com a atuação de técnicos capacitados nesta área.

A produção de sementes é um setor altamente competitivo, no qual um investimento, se bem conduzido, pode resultar em grandes lucros, caso contrário, pode gerar perdas. A implantação de sistemas de irrigação tem uma enorme importância estratégica, pois é uma forma de assegurar o atendimento à demanda por sementes, garantindo e até ampliando a fatia de participação de uma empresa no mercado. Entretanto, requer investimentos elevados, exigindo profissionalismo em seu planejamento e manejo, a fim de garantir custos adequados, uso otimizado de recursos e obtenção dos melhores resultados.

## 8 Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Instalações prediais de água fria**. NBR-5626, Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 41 p.
- AZEVEDO NETO, J. M. **Manual de hidráulica**. 8 Ed., São Paulo, Ed. Edgard Blucher, Ltda, 1998, 688p.
- BACCHI, O.O.S.; GODOY, R.; FANTE JR., L.; REICHARDT, K. Balanço hídrico em cultura de aveia forrageira de inverno na região de São Carlos-SP **Scientia Agrícola**, Piracicaba, vol. 53, n. 1, p. 172-178, 1996.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 625 p.
- BRASIL. **Tempo de irrigar**: manual do irrigante. Programa Nacional de Irrigação, São Paulo: Mater, 1987. 160p.
- CALVACHE A.M.; REICHARDT K.; MALAVOLTA E.; BACCHI O.O.S. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso de água em uma cultura do feijão. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 54, n. 3, p. 232-240, 1997.
- CAUDURO, F. A. e DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre : PRONI : IPH-UFRGS, [1988]. 216 p.
- DASTANE, N.G. **Effective rainfall in irrigated agriculture**. Roma: FAO. 1978. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 25). (disponível em : <http://www.fao.org/docrep>).
- DENICULI, W. **Bombas Hidráulicas**. Viçosa: UFV. 1993. 162 p.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 2 ed. Roma: FAO, 1977. 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).
- ENGEORPS Manual de Outorga. In: **Relatório 210- SRH-MAO-RT-006/98**, Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, Fundação Arthur Bernardes, Brasília, 1998.
- GALBIATTI, J. A.; BORGES, M. J.; BUENO, L. F.; GARCIA, A.; VIEIRA, R. D. Efeito de diferentes períodos de irrigação no desenvolvimento, produção e qualidade de

sementes na cultura do milho (*Zea mays* L.). **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.2, p.301-308, maio/ago. 2004.

GILLEY, J.R. Suitability of reduced pressure center-pivots. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.110, n.1, p.22-34, May 1984.

GILLEY, J.R.; HACKBART, C.A.; STETSON, L.E.; FEYEN, J. Energy management. In : HOFFMAN, G.J.; HOWEL, T.A.; SOLOMON, K.N. (Ed.) **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1990. p.719-746.

GILLEY, J.R.; WATTS, D.G. Possible energy savings in irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v.103, n.1R4, p.445-457, Dec. 1977.

GLOBERSON, D.; LEVY, M.; HUPPERT, H.; ELIASSY, R. When to discontinue irrigation of onion grown for seed production. **Acta Horticulturae**, (ISHS) v. 215, p. 17-24, 1987.

GOMES, H. P. Dimensionamento econômico de instalações de recalque. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 6, n. 3 e 4, p. 108-114, 2001.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação**: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento. 2 ed. Campina Grande: UFPB, 1997. 390p.

JOHNSON, B.; BRUMMELS, P.; KUENNING, L. Inventorying Nebraska's irrigation acres. **Cornhusker Economics**. Lincon: IANR, 2001. 2 p.

KLAR, A.E. **Irrigação: frequência e quantidade de aplicação**. São Paulo: Nobel, 1992. 156p.

LENCASTRE, A. **Manual de hidráulica geral**. São Paulo: EdUSP, 1972. 411 p.

MEDEIROS, P. C.; GOMES, H. P. Metodologia de otimização integrada para o dimensionamento de sistemas de irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.331-335, 1999.

MOHAN, S.; SIMHADIRAO, B.; ARUMUGAM, N. Comparative study of effective rainfall estimation methods for lowland rice. **Water Resources Management**, v. 10, n. 1, p. 35-44, 1996.

NASCIMENTO, W. M.; VIEIRA, J. V.; MAROUELLI, W. A. Produção de semente de cenoura. In: **Curso sobre Tecnologia de Produção de Sementes de Hortaliças**, 5, 2005, Brasília: Embrapa Hortaliças, 21p. 2005.

NUTT-POWELL, T. E.; LANDERS, S. **Center pivot irrigation in Nebraska: an institutional analysis case study**. MIT Energy Laboratory Working Paper MIT-EL-79-066. 1979. 57p.

PINTO, N. F. J. A.; COSTA, E. F. Aplicação de fungicidas via água de irrigação por aspersão para o controle da ferrugem-do-feijoeiro-comum. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p.317-321, fev. 1999.

RAVA, C. A.; VIEIRA, E. H. N.; MOREIRA, G. A. **Qualidade fisiológica de sementes de feijoeiro comum produzidas em várzeas tropicais com subirrigação** / – Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 15 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Arroz e Feijão)

SANO, E. E.; LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M.; OLIVEIRA, E. C.. Estimativa da variação na demanda de água para irrigação por pivô-central no Distrito Federal

entre 1992 e 2002. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.508-515, maio/ago. 2005.

SCHERER, T. **Selecting a Sprinkler Irrigation System**. AE-91. Fargo: NSDU, 2005. 3 p.

SCHNEIDER, A. D. Efficiency and uniformity of the LEPA and spray sprinkler methods. **Transactions of the ASAE**, v. 43, n. 4, p. 937-944. 2000.

SHIKLOMANOV, I. A. et al. **Assessment of water resources and water availability in the world**; St. Petersburg: State Hydrological Institute, 1996.

SILVA, E. C. ; MACIEL, G. M. ; BAVUSO NETO, P. ; MARQUES, D. J. ; SILVA, F. A. F. ; GONZATTI, K. . Doenças fúngicas e bacterianas em cultura da batata cultivada sob irrigação localizada e aspersão.. In: 45 Congresso Brasileiro de Olericultura, 2005, Fortaleza - CE. **Horticultura Brasileira**. Brasília : ABH, 2005. v. 23.

SOARES, W. R.; SEDIYAMA, G. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, J. M. N. Coeficientes de cultura no estágio de desenvolvimento inicial (kCini) para diferentes texturas de solos. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal: SBEA, v. 21, n. 3, p. 218-226, 2001.

STEINMETZ, S.; ASSIS, F. N.; SOARES, W. R. Estimativa da radiação solar global a partir da insolação na região de Pelotas, Rio Grande do Sul. **Agropecuária Clima Temperado**. Pelotas, v. 2, n. 1, p. 77-85, 1999.

TAVARES, V. E. Q. ; RIBEIRO, M. M. R. ; LANNA, A. E. L. . Valoração monetária de bens e serviços ambientais: revisão do estado-da-arte sob a ótica da gestão das águas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 97-116, 1999.

TEIXEIRA, M. B.; MELO, R. F.; COELHO, R. D. Coeficiente de descarga de emissores de pivô central. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 1, p. 123-134, '2007.

TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. **Agricultural water conservation practices**. Austin: TWDB, 2003. 16 p.

VIEIRA-JUNIOR, P.; DOURADO-NETO, D.; SMIDERLE, O. J.; CÍCERO, S. M. Efeitos de métodos de irrigação sobre a produção e a qualidade de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, vol. 20, no 1, p.100-105 – 1998.