

Análise de Desempenho da Irrigação





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1517-5111

Dezembro, 2002

Documentos 70

Análise de Desempenho da Irrigação

Euzebio Medrado da Silva
Juscelino Antonio de Azevedo
Jorge Enoch Furquim Werneck Lima

Planaltina, DF
2002

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina - DF

Fone: (61) 388-9898

Fax: (61) 388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Supervisão editorial: *Nilda Maria da Cunha Sette*

Revisão de texto: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Jaime Arbués Carneiro

Normalização bibliográfica: *Shirley da Luz Soares*

Capa: *Chaile Cherne Soares Evangelista*

Editoração eletrônica: *Jussara Flores de Oliveira*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*

Jaime Arbués Carneiro

Impresso no Serviço Gráfico da Embrapa Cerrados

1ª edição

1ª impressão (2002): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.

Embrapa Cerrados.

S586a Silva, Euzebio Medrado da.

Análise de desempenho da irrigação. / Euzebio Medrado da Silva,
Juscelino Antonio de Azevedo, Jorge Enoch Furquim Werneck Lima.
– Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2002.

84 p. — (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; 70)

1. Irrigação – avaliação. 2. Sistema de irrigação. 3. Irrigação –
eficiência. I. Azevedo, J.A. de. II. Lima, J.E.F. III. Título. IV. Série.

631.587 - CDD 21

© Embrapa 2002

Autores

Euzebio Medrado da Silva

Doutorado, Engenharia de irrigação,
Embrapa Cerrados
euzebio@cpac.embrapa.br

Juscelino Antonio de Azevedo

Doutorado, Solos e nutrição de plantas,
Embrapa Cerrados
juscelin@cpac.embrapa.br

Jorge Enoch Furquim Werneck Lima

Mestrado, Irrigação e agroambientes,
Embrapa Cerrados
jorge@cpac.embrapa.br

Apresentação

A expansão da agricultura no Cerrado vem transformando esta região no grande celeiro de alimentos do Brasil, especialmente, nas áreas de produção de grãos e de carne bovina. Um fator preponderante dessa expansão tem sido, sem sombra de dúvidas, a utilização de tecnologias modernas de produção desenvolvidas pela Embrapa e seus parceiros. Entre as tecnologias introduzidas, a irrigação pressurizada tem sido responsável pelo incremento da produção agrícola, tanto pelo aumento da produtividade quanto da estabilidade da produção, devido, em especial, à manutenção da oferta de água independentemente do caráter aleatório das chuvas. A irrigação também permite a oferta de produtos no mercado em épocas de melhores preços, além de diversificar a produção, a exemplo da fruticultura irrigada que vem despontando em várias regiões do País, notadamente no Nordeste brasileiro.

Esses benefícios, entretanto, só podem ser alcançados em sua plenitude quando o sistema de irrigação for bem dimensionado e utilizado com critérios de manejo que resultem em aplicações de água em quantidades compatíveis com as necessidades de consumo das culturas. Infelizmente, muitos produtores ainda utilizam seus sistemas de irrigação sem se preocupar com a racionalização no uso da água, podendo, assim, cometer erros, ao irrigar em excesso ou em deficiência, causando problemas tanto ao meio ambiente como na própria produtividade das culturas. Essa utilização inadequada da irrigação poderia ser evitada, se as técnicas de manejo de água, já desenvolvidas pela Embrapa e seus parceiros, fossem efetivamente incorporadas aos sistemas agrícolas irrigados.

Apesar de os custos de energia estarem cada vez mais elevados e representarem um dos principais componentes dos custos de produção dos sistemas irrigados, a maioria dos produtores, ainda, não utiliza técnicas racionais de manejo da água as quais, se efetivamente adotadas, certamente, resultariam na redução de pelo menos 20% no consumo da água, sem contar com os benefícios diretos ao meio ambiente. Espera-se que com implementação efetiva da legislação atual sobre gestão de Recursos Hídricos, que prevê a cobrança pelo uso da água, venha contribuir para a maior conscientização dos produtores irrigantes sobre a necessidade de melhor utilizar os recursos hídricos.

Um dos principais fatores, responsáveis pelo uso ineficiente da água na irrigação, é a carência de conhecimento sobre a distribuição da água em sistemas irrigados, dificultando a utilização de técnicas de análise de desempenho que, se empregadas adequadamente, poderiam minimizar os problemas ocasionados pela baixa uniformidade de aplicação da água na irrigação. Este trabalho chega em momento oportuno, trazendo técnicas de análise para avaliação do desempenho dos sistemas pressurizados de irrigação as quais são apresentadas de forma didática, com vários exemplos, facilitando sua compreensão, o que certamente estimulará profissionais e estudantes, com interesse na irrigação, a se envolverem na luta pelo uso racional da água na agricultura.

Carlos Magno Campos da Rocha
Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

Sumário

Introdução	9
Esquema de Coleta de Dados	11
Aspersão convencional	12
Sistemas com laterais móveis	14
Sistemas com laterais fixas	18
Aspersão móvel com deslocamento linear	19
Autopropelido com apenas um aspersor	20
Autopropelido com aspersores montados em laterais	23
Irrigação por pivô-central	24
Irrigação localizada	28
Análise dos Dados Coletados	32
Áreas representativas dos coletores	33
Coletores representando áreas iguais	34
Coletores representando áreas desiguais	34
Modelagem da água distribuída	38
Formulação matemática proposta	38
Ajuste dos parâmetros do modelo	39
Limite da área adequadamente irrigada	43
Parâmetros de análise de desempenho da irrigação	45
Medidas de uniformidade	45

Coeficiente de uniformidade Christiansen (CUC)	46
Coeficiente uniformidade de distribuição (CUD)	55
Medidas de eficiência	61
Eficiência de aplicação de água	61
Adequação da área irrigada	63
Fator de adequação da irrigação	64
Indicadores de desempenho da irrigação ajustada	67
Volume total de água ajustado	67
Volume excedente de água ajustado	67
Volume útil de água ajustado	68
Eficiência de aplicação de água ajustada	68
Exemplo de aplicação	68
Considerações Finais	69
Anexo – Derivação de Fórmulas	71
Lâmina média	71
Média absoluta dos desvios	73
Média do quartil inferior	76
Volume excedente	76
Volume excedente ajustado	77
Referências Bibliográficas	81
Abstract	85

Análise de Desempenho da Irrigação

Euzebio Medrado da Silva

Juscelino Antonio de Azevedo

Jorge Enoch Furquim Werneck Lima

Introdução

Os sistemas de irrigação são normalmente projetados e operados visando a atender, sem desperdício da água, aos requerimentos de água de cada cultura irrigada. Entretanto, por melhor que seja o projeto, sempre existem perdas de água que podem ocorrer durante sua condução e sua distribuição na área irrigada. Essas perdas são praticamente inevitáveis, contudo, ao se projetar e manejar o sistema de irrigação é possível fazê-lo de modo que o desperdício seja minimizado e não prejudique o rendimento das lavouras. Segundo [Peri et al. \(1979\)](#), para cada sistema de irrigação, existe um ponto de equilíbrio econômico entre a quantidade de água aplicada em excesso e em deficiência, que a atividade agrícola pode suportar de forma sustentável.

Com a elevação nos custos de energia e a crescente competição por água entre as atividades urbanas, industriais e agrícolas, aliada à preocupação ambiental associada ao uso dos recursos hídricos, cresce cada vez mais a pressão da sociedade sobre esses usuários, para que se adotem medidas que resultem na redução do consumo e na manutenção da qualidade dos corpos d'água. Segundo [Walker \(1979\)](#), no caso dos sistemas agrícolas irrigados, os ganhos associados à uniformidade de aplicação da água afetam necessariamente as decisões relativas ao dimensionamento do sistema de irrigação. Um sistema caracterizado por uniformidades de aplicação elevadas e, possivelmente, alto grau de eficiência de irrigação, quase sempre requer investimentos iniciais

elevados, o que pode tornar inviável o empreendimento do ponto de vista econômico. Por sua vez, sistemas com uniformidades de aplicação elevadas são altamente desejáveis, pois otimizam os rendimentos das culturas e reduzem a quantidade de água aplicada por unidade de alimento produzido, com reflexos positivos sobre o meio ambiente.

O dimensionamento otimizado de sistemas de irrigação e seu manejo passam necessariamente por decisões que dependem do conhecimento das relações entre a uniformidade de distribuição da água, sua eficiência de aplicação e os critérios operacionais adotados no manejo da água a serem aplicados ao longo do ciclo da cultura ([Silva et al., 1999](#)). Essas relações, que formam um conjunto de medidas essenciais para avaliação de desempenho do sistema de irrigação, têm sido amplamente estudadas. Na irrigação por aspersão, destacam-se, dentre outros, os trabalhos pioneiros de [Christiansen \(1942\)](#), [Hart & Reynolds \(1965\)](#), [Davis \(1966\)](#), [Wilcox & Swailes \(1947\)](#), [Hart & Heermann \(1976\)](#). Na irrigação localizada, destacam-se, dentre outros, os trabalhos desenvolvidos por [Keller & Karmeli \(1974\)](#), [Karmeli & Keller \(1975\)](#), [Solomon & Keller \(1978\)](#), [Nakayama et al. \(1979\)](#), [Wu & Gitlin \(1983\)](#). Na irrigação por superfície, destacam-se os trabalhos de [Karmeli \(1978\)](#), [Silva \(1990\)](#) e outros.

O desempenho de qualquer sistema de irrigação pode ser medido por meio do levantamento de parâmetros de eficiência inerentes à condução, distribuição e aplicação da água, em cada área da propriedade irrigada ([Kruse & Heermann, 1977](#)). Segundo [Hart et al. \(1979\)](#), ao nível da parcela irrigada, são suficientes três índices de eficiência e apenas um índice de uniformidade para avaliar o desempenho da distribuição de água. Se as perdas de água por escoamento superficial não forem significativas e, portanto, desconsideradas, então, os índices de eficiência ficarão reduzidos a dois. Para avaliação do sistema de irrigação, incluindo a rede de condução da água do ponto de captação até a área irrigada, são necessários índices adicionais de eficiência, como por exemplo, a eficiência de condução, principalmente quando se trata do transporte da água em canais abertos e não revestidos.

Não obstante o reconhecido documento pioneiro de [Merriam e Keller \(1978\)](#), publicado com a finalidade de servir de guia para avaliação de vários sistemas de

irrigação, este trabalho, além de apresentar os principais conceitos e rotinas de análise para avaliação de desempenho da irrigação pressurizada, vem reforçar o entendimento sobre as relações entre uniformidade e eficiência de aplicação de água para ajudar o usuário no processo decisório inerente às estratégias de manejo da água requerida pelas plantas. O trabalho enfoca basicamente o desempenho da irrigação pressurizada, destacando os métodos de irrigação por pivô-central; irrigação localizada, aspersão convencional e os sistemas de aspersão com deslocamento linear. No entanto, as rotinas apresentadas podem ser facilmente adaptadas para situações particulares, desde que o processo de obtenção de dados resulte em lâmina ou vazão da água aplicada, em determinada fração representativa da área irrigada.

Esquema de Coleta de Dados

O esquema de coleta de dados para avaliação de desempenho do sistema de irrigação é fundamental e varia de acordo com o método de irrigação empregado. Por exemplo, na irrigação por aspersão convencional, a disposição dos coletores na área depende da forma como as linhas laterais de irrigação, as quais alimentam os aspersores, operam. Se o sistema funciona com linhas fixas, os coletores deverão ser colocados na área compreendida entre duas laterais adjacentes. Por sua vez, se o sistema opera com linhas laterais móveis as quais mudam uma posição de cada vez, depois de cumprir determinado período de aplicação de água, os coletores são distribuídos em ambos os lados da lateral. Nos casos de sistemas de irrigação de deslocamento linear, a exemplo do autopropeido, os coletores são distribuídos transversalmente na faixa de domínio da área molhada. Na irrigação localizada, representada pelo gotejamento e pela microaspersão, normalmente, são realizadas coletas de vazões de emissores previamente selecionados, sendo possível, também, a coleta da lâmina de água distribuída pelos microaspersores, quando houver interesse na avaliação de desempenho do padrão de distribuição na faixa de alcance da área molhada pelos emissores. Finalmente, vale destacar o esquema típico de avaliação do sistema de irrigação por pivô-central em que os coletores são dispostos radialmente, ao longo da faixa de domínio da área molhada pela lateral do equipamento. O trabalho de [Merriam & Keller \(1978\)](#) traz uma série de ilustrações e recomendações sobre esse assunto.

No caso da coleta de água nos sistemas de irrigação por aspersão, é importante ressaltar que cada coletor deve ser cuidadosamente instalado em uma posição vertical, com seu topo paralelo ao nível do terreno, como se estivesse assentado com sua entrada instalado na superfície do solo. Além disso, é importante remover qualquer vegetação que possa interferir na coleta da água ([Merriam & Keller, 1978](#)). Obviamente, por isso, nos cultivos anuais, recomenda-se que a avaliação seja realizada antes do plantio ou, então, com as plantas ainda pequenas cujo porte esteja, ainda, abaixo da altura de posicionamento do coletor. Vale destacar, também, que o sistema deve ser avaliado nas condições preconizadas de operação do projeto, ou seja, com aspersores ou emissores, dependendo do caso, desentupidos e funcionando na pressão de serviço recomendada.

As medidas de volume devem ser realizadas com cilindros graduados de precisão, normalmente de 250 a 500 mL, dependendo do tempo de operação e da taxa de aplicação do sistema. No caso de medição de vazão de aspersores, pode haver necessidade de utilização de cilindro graduado de até 2000 mL, para reduzir o tempo de medição dos volumes coletados. Outros equipamentos como cronômetro, anemômetro portátil e medidor de pressão, adaptados com tubos de pitot, são importantes no processo de avaliação de desempenho dos sistemas de irrigação pressurizados ([Merriam & Keller, 1978](#)).

A seguir, são apresentados os principais esquemas típicos de distribuição dos coletores para cada um dos sistemas mencionados, destacando as características de representatividade dos coletores em relação à área de influência de cada lâmina ou vazão coletada.

Aspersão convencional

Os conjuntos denominados por aspersão convencional são aqueles que apresentam os aspersores colocados sobre as linhas de irrigação dispostas na superfície do solo. Nesse tipo de sistema, as tubulações podem ser fixas e/ou móveis. Nos sistemas móveis, a linha principal é, geralmente, fixa e as laterais móveis. Em relação à pressão de operação, segundo [Azevedo et al. \(1983\)](#), os aspersores podem ser pequenos médios e grandes (canhões). Com aspersores pequenos ou médios, a pressão de serviço varia de 1,5 a 3,0 kgf/cm² e, com

aspersores grandes, de 4,0 a 6,0 kgf/cm². O espaçamento entre aspersores varia de 6 a 42 metros e entre linhas laterais, de 9 a 48 metros. Segundo [Merriam & Keller \(1978\)](#), a distribuição das linhas laterais e principais deve ser de tal forma que o sistema opere com máxima eficiência e mínimo custo. Normalmente, recomenda-se colocar as linhas laterais no sentido do nível do terreno, fazendo com que o primeiro e o último aspersores se encontrem, mais ou menos, na mesma altura, visando a reduzir a diferença de pressão e de vazão entre os aspersores dos extremos da linha. Entre os sistemas de irrigação pressurizados, esses são os mais exigentes em mão-de-obra.

Os aspersores não aplicam água uniformemente em todo o seu raio de alcance. O aspersor, na realidade, aplica mais água perto dele e menos na periferia de sua área molhada. Isso obriga a se fazer o planejamento da distância entre aspersores, de tal forma que haja certa sobreposição entre o jato de um e o de outros aspersores adjacentes, de modo a resultar na melhor uniformidade de distribuição da água. Além disso, o raio teórico de alcance dos aspersores pode ser bastante afetado pela velocidade do vento. Segundo [Addink et al. \(1983\)](#), sob condições de pouco ou nenhum vento, o espaçamento efetivo entre aspersores e linhas de irrigação deve ter no máximo 65% do diâmetro molhado indicado pelo fabricante, com velocidades de vento de até 8 km/h, esses espaçamentos devem ser limitados em 60% do diâmetro molhado; com vento de 8 a 16 km/h, a redução sobre o diâmetro molhado será de 50%; e, finalmente, para velocidades de vento superiores a 16 km/h, a redução deverá ser de 30% do diâmetro molhado.

Recomenda-se, na prática, caso não existam impedimentos de ordem hidráulica, dispor as linhas laterais em posições aproximadamente perpendiculares à direção predominante do vento, selecionando a distância entre aspersores menor do que o espaçamento entre linhas. Essa prática minimiza a influência do vento sobre a distribuição global da água aplicada na área irrigada. Assim procedendo, reduz-se o número de posições na área irrigada e, com isso, diminuem-se os requerimentos de mão-de-obra com mudança de linhas. Exemplos de espaçamentos que são normalmente empregados, com a adoção desse critério, são 12 x 18 m, 18 x 24 m, 24 x 36 m, 36 x 48 m, no qual o primeiro número representa a distância entre aspersores e o segundo, o espaçamento entre linhas.

Sistemas com laterais móveis

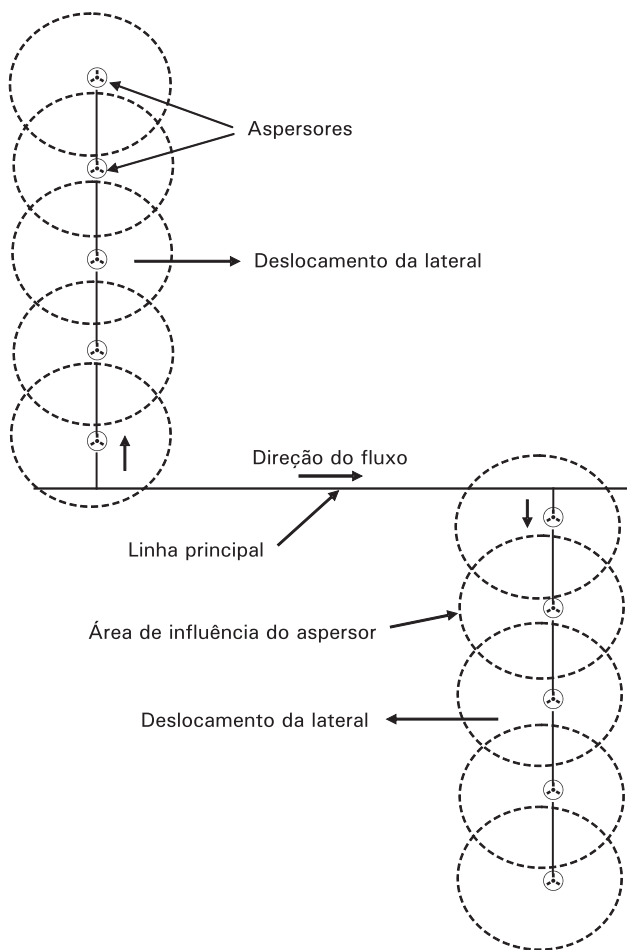


Figura 1. Esquema de posicionamento de duas laterais móveis de aspersores, deslocando-se independentemente em cada lado da linha principal.

Nesse esquema de irrigação (Figura 1), normalmente, as laterais são deslocadas, em posições previamente fixadas, partindo-se das extremidades da linha principal, situação em que, do ponto de vista hidráulico, é menor a variação de pressão na tubulação que alimenta as laterais, uma vez que apenas metade da vazão, depois que alimenta a primeira lateral, fluirá ao longo de, praticamente,

toda linha principal para suprir a última lateral. A situação hidráulica mais desfavorável, nesse caso, ocorrerá quando as duas laterais se encontrarem, na metade da linha principal. Certamente, em sistemas bem projetados, essa situação deverá ser sempre utilizada como a mais crítica no cálculo das perdas de carga, com vistas ao dimensionamento do diâmetro da tubulação e determinação da pressão de entrada nas laterais e, conseqüentemente, da pressão de operação dos aspersores.

Nessa modalidade de irrigação por aspersão, os coletores são normalmente distribuídos em ambos os lados da linha de irrigação, na área de ação de pelo menos dois aspersores. Os coletores são dispostos no centro de cada quadrícula representativa da área de coleta. As quadrículas devem ser projetadas com dimensões máximas de 3 por 3 m, totalizando, no mínimo, 24 unidades de cada lado da linha de aspersores, como indicado na Figura 2. É importante destacar a necessidade de se projetar coletores adicionais, posicionados em quadrículas além do alcance teórico dos aspersores, prevendo a possibilidade de distorção produzida pelo vento, para mais ou para menos, no raio de alcance do jato de água dos aspersores.

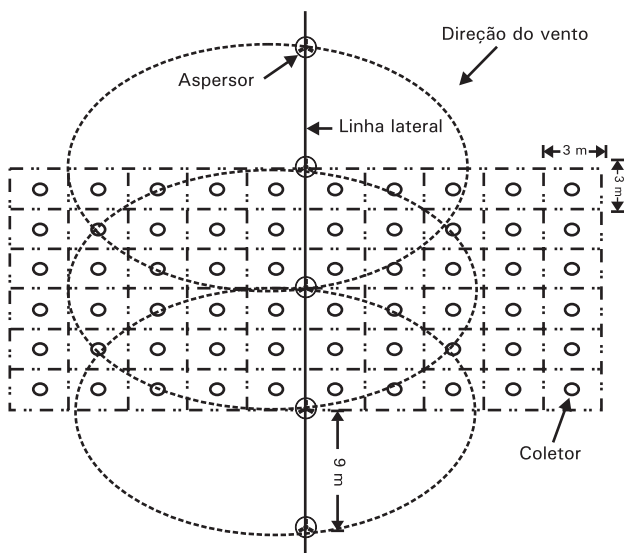


Figura 2. Disposição de coletores, distribuídos em uma malha de 3 x 3 m, em ambos os lados de uma lateral de irrigação, recebendo contribuição de três aspersores, espaçados de 9 m na linha.

A avaliação poderá ser realizada em apenas uma posição da lateral, naquela que melhor represente a pressão de serviço do sistema de irrigação ou, ainda, nas duas extremidades da lateral, quando houver interesse em analisar a influência da diferença de pressão na linha sobre a distribuição da lâmina aplicada. Em termos práticos, a pressão média da lateral de aspersores, com uma diferença de pressão em torno de 20% entre as extremidades da linha, ocorre a uma distância de aproximadamente 40% do início da lateral ([Merriam & Keller, 1978](#)).

Para melhor compreensão desse esquema de coleta de dados, considerando os dados obtidos, em volume (mL), provenientes da contribuição de três aspersores, operando durante 1h35, conforme o esquema apresentado na Figura 3.

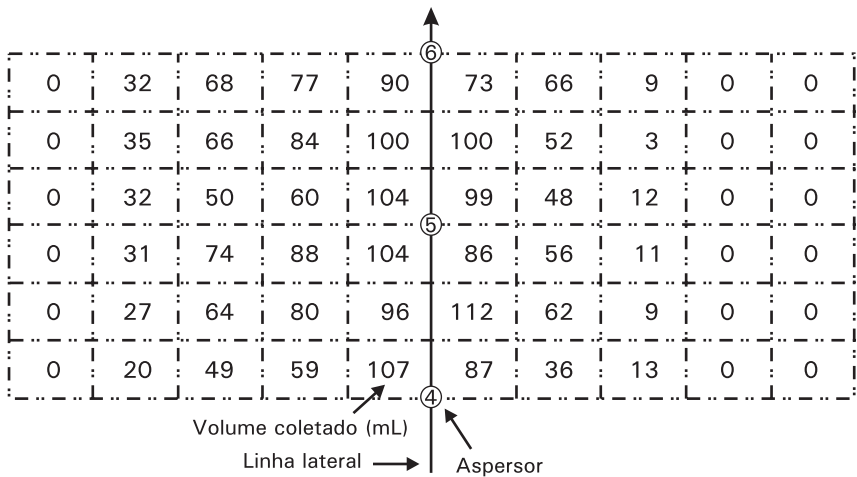


Figura 3. Volumes (mL) obtidos, em ambos os lados de uma lateral de irrigação, com contribuição de três aspersores (4, 5 e 6), durante 1h35 de aplicação, usando coletores com área de entrada de 78,74 cm² e posicionados no centro de cada malha, com dimensões de 3 x 3 m.

Observar que na Figura 3 os resultados dos volumes coletados refletem a influência do vento, que promoveu certa distorção no perfil de distribuição de água dos aspersores, aumentando para esquerda o alcance da água aplicada e, conseqüentemente, reduzindo-o no lado direito da linha de irrigação. Observa-se que existem duas colunas de coletores, com volume zero, no lado direito da linha de aspersores e apenas uma coluna de valores nulos no lado esquerdo. Os valores nulos, nesse caso, indicam, também, que o número de coletores distribuídos em ambos os lados da linha de irrigação foi suficiente para cobrir toda a área de abrangência dos aspersores.

Na análise desse tipo de informação, é necessário simular o funcionamento simultâneo da mesma lateral em duas posições diferentes, assumindo que o padrão de distribuição da água seja mantido. Para isso, tomam-se os valores coletados de um dos lados da lateral e faz-se uma sobreposição aos valores coletados no outro lado da lateral, imaginando a mesma lateral posicionada a uma distância equivalente ao espaçamento projetado entre as linhas de irrigação. Para exemplificar essa operação, considere os valores coletados, entre os aspersores 5 e 6, de ambos os lados da lateral de irrigação no esquema indicado na [Figura 3](#). Assumindo a lateral mantida em sua posição original e simulando-a em operação simultânea, posicionada à direita, a uma distância de 12 metros, os volumes coletados do lado esquerdo deverão ser sobrepostos aos da direita (Figura 4). A soma dos valores coincidentes na mesma quadrícula resultará no volume total que seria aplicado se as duas linhas laterais estivessem operando simultaneamente no espaçamento indicado.

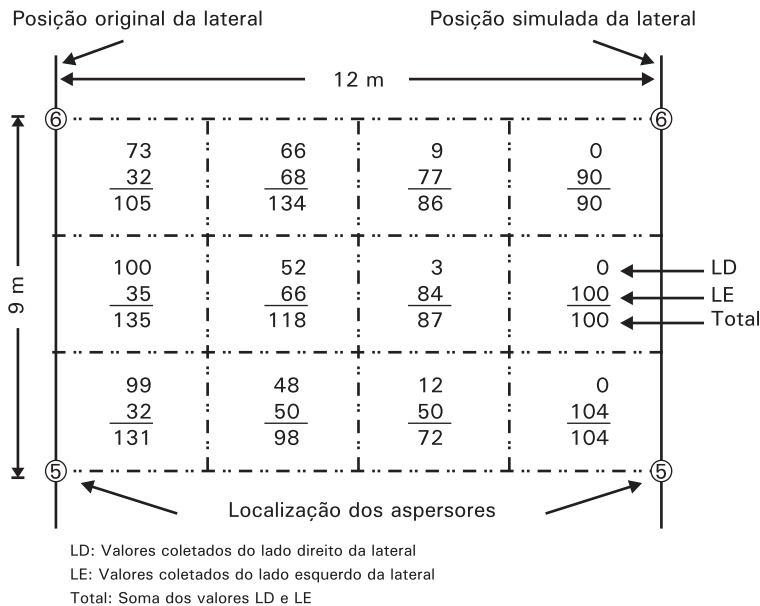


Figura 4. Volumes (mL) totais obtidos, realizando a sobreposição das coletas de água, de ambos lados de uma lateral de irrigação, considerando os coletores com área de entrada 78,74 (cm²), distribuídos entre dois aspersores, operando durante 1h35 de aplicação, simulando um espaçamento de 12 m entre laterais.

Sistemas com laterais fixas

Neste caso, cada setor do sistema de irrigação opera com linhas de laterais fixas. Observe o esquema ilustrado na Figura 5, no qual a área a ser irrigada foi dividida em previstos quatro setores. Esse modelo de irrigação prioriza a economia de mão-de-obra, mas encarece sobremaneira o custo inicial do investimento. Uma solução intermediária é a utilização apenas das laterais fixas, realizando a mudança dos aspersores, os quais são montados em válvulas de conexão rápida.

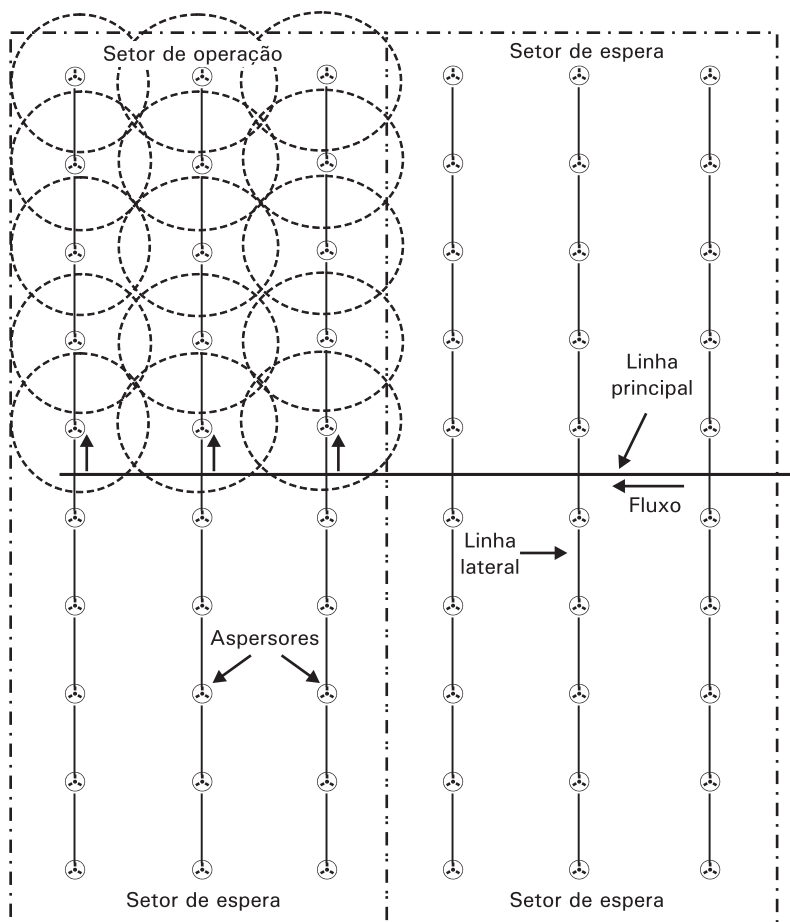


Figura 5. Esquema de posicionamento de laterais fixas, com aspersores alimentados por uma linha principal, em um sistema composto de quatro setores de irrigação.

Para avaliação desse esquema de irrigação, normalmente escolhem-se quatro aspersores que melhor representem a média de pressão de serviço projetada para o sistema. Além disso, é recomendável que o tempo de coleta seja suficiente para obtenção de uma quantidade média de água próxima da lâmina normalmente requerida em uma dada irrigação. Em geral, recomenda-se que a duração do teste seja suficientemente longa para coleta pelo menos de 10 a 12 mm de água ([Merriam & Keller, 1978](#)). Um exemplo da disposição de coletores e suas respectivas lâminas (mm) de água aplicada se encontra ilustrado na Figura 6.

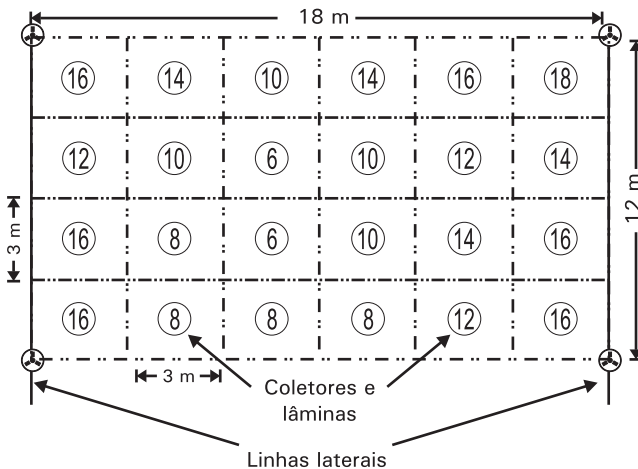


Figura 6. Disposição dos coletores com suas respectivas lâminas de água aplicada (mm), distribuídos em uma malha de 3 x 3 m, recebendo contribuição de quatro aspersores, espaçados de 12 x 18 m, em um esquema de laterais fixas.

Aspersão móvel com deslocamento linear

Existem diferentes modelos de sistemas de irrigação com características de movimento linear. Os mais conhecidos no Brasil são os sistemas autopropelidos de movimento contínuo, com um ou mais aspersores, conduzidos por uma unidade automotriz ([Azevedo et al., 1983](#)). Além desses, ainda, podem ser encontrados os sistemas de deslocamento linear intermitente, que se caracterizam por permanecer em uma dada posição aplicando água durante o tempo necessário para incorporar a lâmina requerida. Passado esse tempo, a

unidade motriz do sistema é acionada e deslocada para a posição seguinte. Esse tipo de sistema também pode ser dotado de um aspersor montado sobre um carrinho de deslocamento ([Azevedo et al., 1983](#)) ou vários aspersores montados sobre barras laterais suspensas, a exemplo do sistema desenvolvido por [Rocha et al. \(1998\)](#), para aplicação de água e produtos químicos em parcelas experimentais.

Os grandes sistemas mecanizados de irrigação por aspersão de movimento linear foram desenvolvidos, especialmente, para o aproveitamento integral de áreas retangulares. Uma das limitações desses sistemas está na maneira como o suprimento de água é disponibilizado para pressurização dos aspersores. A aparência estrutural mecanizada desses sistemas de irrigação é quase idêntica a do pivô-central, exceto pelo seu deslocamento linear ([Addink et al., 1983](#)). Esses sistemas ainda são pouco utilizados no Brasil, por causa das limitações apontadas, e porque o custo da terra é ainda relativamente baixo para justificar o aproveitamento integral de áreas retangulares, que não ocorre com a utilização do pivô-central tradicional, desprovido de extensores retráteis na extremidade da lateral.

Autopropelido com apenas um aspersor

Esse sistema é basicamente constituído de uma motobomba, tubulação de sucção e recalque, mangueira de alta pressão, unidade autopropelida com aspersor e cabo de aço, podendo operar satisfatoriamente em áreas de diferentes tamanhos, com alto grau de automação. São fornecidos com capacidade para irrigar áreas com extensões variadas. Segundo [Azevedo et al. \(1983\)](#), os sistemas grandes podem irrigar até 100 ha, o médio, até 30 ha, e o pequeno, até 12 ha. O aspersor grande, do tipo canhão, funciona com pressão de 4,5 a 8,0 atmosferas, tendo um alcance de 50 a 80 m e capacidade para aspergir vazões de 65 a 192 m³/h. O aspersor do autopropelido médio funciona a uma pressão de 4,0 a 6,0 atmosferas. A [Figura 7](#) ilustra um esquema típico de funcionamento de um sistema autopropelido para irrigação de 32 ha, tendo que cobrir oito faixas de 400 m de comprimento e 100 m de largura. Certamente, para cobertura das oito faixas previstas, considerando um intervalo típico de irrigação de quatro dias, esse sistema terá de realizar, também, operações noturnas.

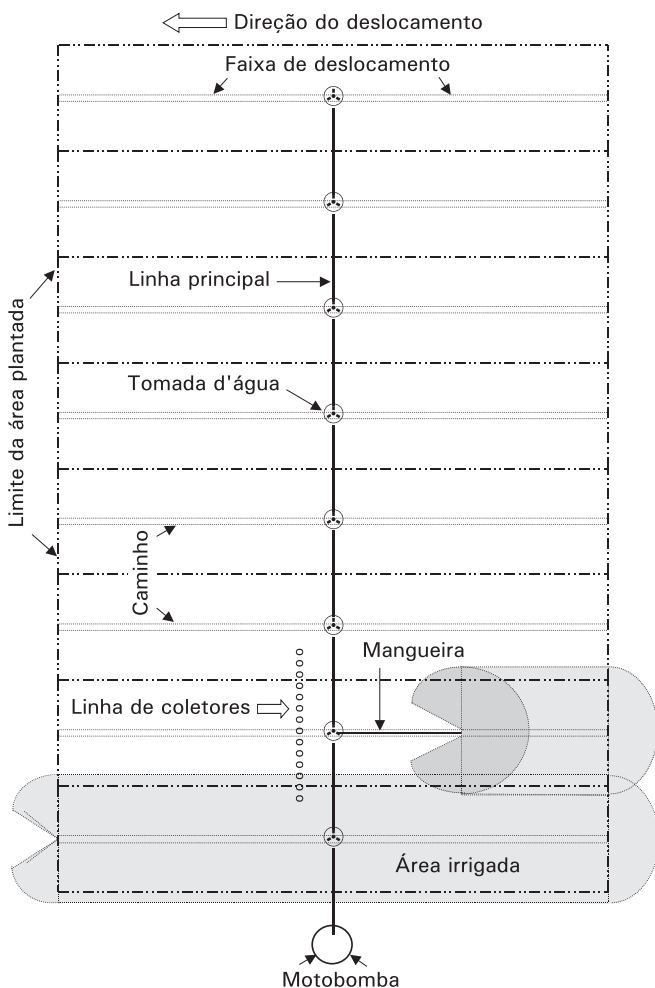


Figura 7. Esquema típico de uma área irrigada com sistema autopropelido, composto por oito faixas de 400 m de comprimento e 100 m de largura, tendo como aspersor do tipo canhão, com bocal de 38 mm de diâmetro, vazão de 113,6 m³/h e pressão de serviço de 7 kgf/cm², deslocando-se a uma velocidade média de 44,0 m/h, para aplicação de uma lâmina média de 25,8 mm.

Como pode ser observado, no sistema autopropelido a mangueira flexível desempenha a função das linhas laterais de um sistema de irrigação por aspersão convencional, resultando em economia de tempo e de pessoal na montagem, desmontagem e transporte dessas linhas. A linha principal pode ser enterrada,

propiciando facilidade nos tratos culturais mecanizados, bem como na própria preparação do solo para a semeadura. Quando em operação, a unidade autopropelida é posicionada em uma das extremidades da faixa a ser irrigada e o sistema de aspersão é então deslocado continuamente para a extremidade oposta. O sistema de tracionamento é bastante variado, dependendo de cada modelo fornecido no mercado (Addink et al., 1983). Existem casos em que a unidade motriz enrola a própria mangueira, que por sua vez arrasta em sua direção o sistema de aspersão. Em outros casos, a própria estrutura de sustentação do aspersor possui um sistema de carretel para enrolar o cabo de aço que se encontra ancorado na extremidade oposta ao posicionamento da unidade autopropelida. O sistema de autopropulsão pode ser elétrico ou hidráulico.

O sistema típico de coleta de água para avaliação desse tipo de irrigação consiste na instalação de uma ou mais linhas de coletores, dispostas transversalmente em relação à direção de deslocamento do equipamento de modo a cobrir toda faixa molhada, devendo, inclusive, prever a colocação de coletores adicionais para captação da água de deriva produzida por alguma distorção do raio de alcance do aspersor devido à ação do vento. A Tabela 1 mostra um resultado típico de coleta de água de um sistema autopropelido. É importante destacar que, em qualquer tipo de equipamento autopropelido de deslocamento contínuo, é indispensável determinar sua velocidade de deslocamento durante o teste para construção de tabelas para indicar os valores de lâmina de água aplicadas nas faixas de velocidade de operação do equipamento.

Tabela 1. Lâminas (mm) de água, obtidas de uma linha de coletores, instalados transversalmente, de 3 em 3 m, em uma faixa irrigada (100 x 400 m) com um sistema autopropelido, deslocando-se a uma velocidade média de 44,0 m/h, com um aspersor do tipo canhão operando com vazão de 113,6 m³/h e pressão de serviço de 7 kgf/cm².

Posição na faixa (m)	Lado esquerdo		Lado direito		Esquerdo mais direito	
	Número do coletor	Volume coletado (mL)	Número do coletor	Volume coletado (mL)	Volume (mL)	Lâmina (mm)
99	1	233			233	29,6
96	2	224			224	28,5
93	3	212			212	26,9
90	4	204			204	25,9
87	5	210			210	26,7

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Posição na faixa (m)	Lado esquerdo		Lado direito		Esquerdo mais direito	
	Número do coletor	Volume coletado (mL)	Número do coletor	Volume coletado (mL)	Volume (mL)	Lâmina (mm)
84	6	197			197	25,1
81	7	199			199	25,3
78	8	191			191	24,3
75	9	179			179	22,7
72	10	170			170	21,6
69	11	154			154	19,5
66	12	135			135	17,2
63	13	127			127	16,1
60	14	143			143	18,2
57	15	139			139	17,7
54	16	129	18	0	129	16,4
51	17	127	17	0	127	16,1
48	18	121	16	0	121	15,3
45	19	104	15	15	118	15,0
42	20	96	14	50	145	18,5
39	21	89	13	89	179	22,7
36	22	69	12	152	220	28,0
33	23	39	11	170	210	26,7
30	24	27	10	214	241	30,6
27	25	10	9	224	235	29,8
24	26	0	8	218	218	27,7
21	27	0	7	208	208	26,4
18			6	204	204	25,9
15			5	195	195	24,8
12			4	204	204	25,9
9			3	224	224	28,5
6			2	251	251	31,9
3			1	260	260	33,0

Fonte: Adaptado de Marriam & Keller (1978).

Autopropelido com aspersores montados em laterais

Este sistema de irrigação opera de forma semelhante ao autopropelido tradicional, diferindo apenas por possuir tubulações laterais suspensas na forma de balanço para suporte de vários aspersores. Seu processo de avaliação é semelhante ao

do autopropelido convencional, utilizando uma ou mais linhas de coletores dispostas transversalmente em relação ao sentido de deslocamento do equipamento.



Francisco Eduardo de Castro Rocha

Figura 8. Autopropelido com aspersores montados sobre laterais.

Além desse sistema de deslocamento linear, com aspersores montados sobre laterais em balanço, existem, também, os grandes equipamentos com laterais montadas em torres mecanizadas, semelhantes ao sistema de tracionamento do pivô-central. Esses sistemas são apropriados para irrigação de grandes áreas retangulares, com comprimento de laterais de até 400 m. Esse sistema depende de um abastecimento central, com alimentação por mangueiras flexíveis acopladas em uma tubulação central pressurizada ou por meio de uma unidade de bombeamento central móvel, abastecendo-se de um canal aberto ao longo da parte central da área irrigada. Alguns desses sistemas podem ser dotados de apenas uma lateral de modo que ao alcançar o final da área irrigada o equipamento possa ser rotacionado para o outro lado da área, a fim de realizar o deslocamento na direção oposta à anterior. A taxa de aplicação de água desse tipo de equipamento é uniforme a longo da lateral e a forma de coleta de água para sua avaliação é muito semelhante aos demais sistemas de deslocamento linear.

Irrigação por pivô-central

Este sistema de irrigação se caracteriza por ter apenas uma lateral com aspersores, que se movimenta em círculo em torno de um ponto fixo chamado ponto pivô. A lateral é sustentada, acima do solo, por meio de uma estrutura metálica, constituída de tesouras, tirantes e cabos de aço, montada em torres

sobre rodas. O movimento da estrutura é feito por motores, instalados em cada uma das torres para acionamento do moto-redutores das rodas. Esses motores são normalmente elétricos, com potência variando entre 0,5 e 1,5 HP ([Azevedo et al., 1983](#)). Existem também os sistemas de pivô-central movidos a óleo ([Addink et al., 1983](#)), os quais são poucos conhecidos no Brasil, mas é comercialmente disponível nos EUA ([T-L Irrigation Company, 2002](#)).

O comprimento da lateral do sistema de irrigação por pivô-central é bastante variado, dependendo da necessidade do produtor, das características topográficas e das dimensões da área a ser irrigada. Existem laterais de pivô-central variando desde 60 m até 790 m de comprimento, correspondendo a uma área irrigada de 1,13 a 196 ha, respectivamente ([Addink et al., 1983](#)). As torres da lateral de um pivô-central são interligadas por meio de junções móveis as quais conferem certa flexibilidade de ângulos verticais e horizontais para acomodar a estrutura metálica às variações de topografia e de alinhamento durante sua movimentação. Nos sistemas elétricos, o alinhamento é alcançado utilizando-se de um mecanismo de acionamento elétrico que pára o movimento de determinada torre quando a lateral está alinhada, ou põe em funcionamento essa torre quando a lateral atinge um ângulo preestabelecido de desalinhamento. A velocidade de rotação é determinada pela movimentação da última torre, que comanda as demais ao se deslocarem em resposta ao acionamento de cada respectivo motor, buscando sempre a manutenção do grau de alinhamento preestabelecido ([Azevedo et al., 1983](#)).

O sistema de irrigação por pivô-central caracteriza-se pela aplicação de água em taxas crescentes a partir do ponto pivô. Essa característica, de certa forma, representa limitação no uso do pivô-central, tornando-o mais apropriado para solos com alta capacidade de infiltração de água. A intensidade de aplicação da água na extremidade final do equipamento aumenta com o comprimento da lateral. De modo que os problemas de escoamento superficial geralmente surgem nas últimas torres do pivô-central. A ocorrência de escoamento de água na superfície é indesejável tanto do ponto de vista da uniformidade de distribuição da água com das possibilidades de erosão do solo. Na eventualidade da taxa de aplicação de água exceder à capacidade de infiltração de água no solo, pode-se adotar um regime de manejo de água, baseado em aplicações mais freqüentes de água para minimizar a ocorrência de escoamento superficial ([Silva & Azevedo, 1998](#)). A Figura 9 ilustra curvas típicas de aplicação de água na extremidade da lateral de um pivô-central em comparação com a capacidade de infiltração de água no solo.

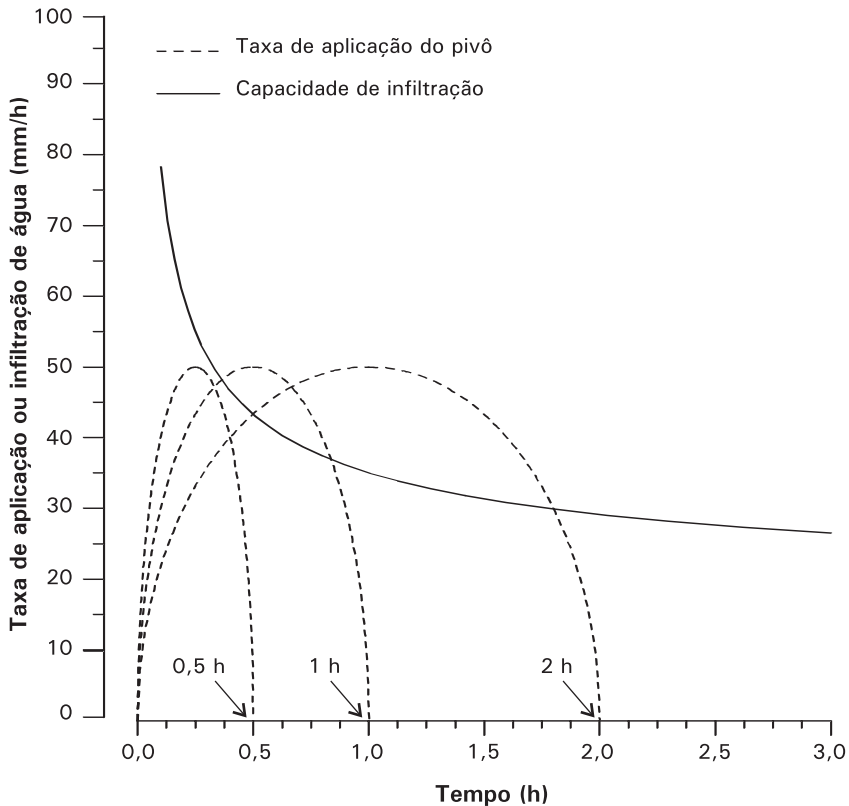


Figura 9. Características de infiltração do solo e curvas de distribuição de água típicas da extremidade final da lateral de um pivô-central, considerando três velocidades de operação.

Preenchido o armazenamento superficial, durante o período de tempo em que a taxa de aplicação de água do pivô excede a velocidade de infiltração de água no solo, existe o potencial de ocorrência do escoamento superficial. Esta é uma das informações básicas utilizadas no dimensionamento do comprimento da lateral de um pivô-central. Caso esta situação venha ocorrer futuramente, devido a uma redução na capacidade de infiltração de água no solo, ocasionado, por exemplo, pela compactação do solo, uma das formas de minimizar o problema é manejar o equipamento com aplicações lâminas menores, procurando manter o pico da taxa de aplicação de água do pivô abaixo da curva de infiltração da água no solo.

Nesse sistema de irrigação, [Merriam & Keller \(1978\)](#) recomendam que os coletores sejam dispostos em quatro raios do círculo irrigado pelo pivô-central,

enquanto, a norma estabelecida pela Hahn & Rosentreter (1989) preconiza que o teste deve ser conduzido utilizando pelo menos duas linhas de coletores. Preferência deve ser dada para as duas direções radiais consideradas posições hidráulicas críticas de funcionamento, ou seja, em aclave ou declive. Caso seja utilizado apenas uma única linha de coletores, conforme ilustrado na Figura 10, que seja dada preferência para a posição da lateral em aclave, pois, nesta situação, o sistema de bombeamento será mais exigido em relação ao suprimento da pressão necessária para operação adequada dos aspersores localizados na extremidade da lateral. Ainda segundo Hahn & Rosentreter (1989), os coletores devem ser espaçados uniformemente e localizados em linha reta, com um espaçamento máximo equivalente a 30% da média do diâmetro molhado dos aspersores, não sendo recomendado espaçamento inferior a 4,5m.

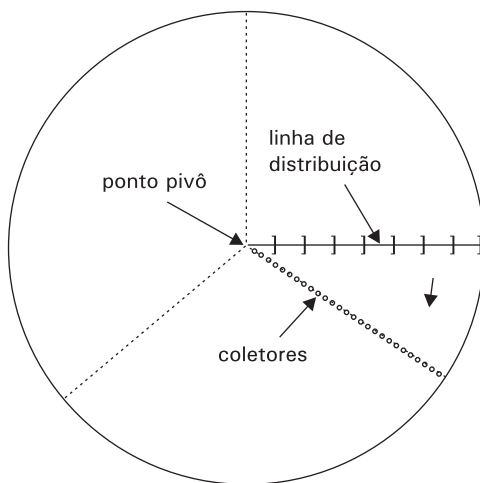


Figura 10. Esquema de posicionamento radial dos coletores para avaliação da água aplicada em sistemas irrigados por pivô-central.

Os coletores devem ser localizados de modo a não sofrer interferência da cultura, por isso, recomenda-se realizar o teste antes do plantio ou no máximo quando a cultura ainda estiver com uma altura inferior a do coletor. Quando isso não for possível, ainda existe a possibilidade da disposição dos coletores na estrada de acesso ao ponto pivô. A entrada dos coletores deve ser nivelada e localizada entre 30 e 125 cm acima do solo, respeitando o limite de máximo de 150 cm entre a saída do aspersor e entrada do coletor. É desejável que a velocidade de teste do equipamento seja regulada objetivando coletar pelo menos 12,5 mm de

água em média. É claro, que outras velocidades com lâminas menores podem ser utilizadas, desde que as coletas de água sejam realizadas com rapidez suficiente para minimizar as perdas por evaporação, uma vez que, segundo [Cotrim et al. \(1988\)](#), os valores da uniformidade de distribuição independem da velocidade operação.

Como em todo sistema de deslocamento contínuo é imprescindível determinar sua velocidade de deslocamento durante o teste, para construção de tabelas para indicar os valores de lâmina de água aplicadas nas faixas de velocidade de operação do equipamento. No caso do pivô-central, a velocidade de deslocamento é comandada pelo motor da última torre, de modo que esta aferição deve ser feita medindo o período de tempo gasto por esta torre para percorrer uma distância de, por exemplo, 30 m. Nos sistemas de deslocamento com motores elétricos, se o percentímetro regulador da velocidade do equipamento for estabelecido em 100%, o movimento da última torre será contínuo. Se regulagem for estabelecida em 50%, então, ao percorrer a distância previamente estabelecida, a torre permanecerá metade do tempo em movimento e metade parada. Esta é uma forma prática de aferição da acuracidade do referido percentímetro.

Irrigação localizada

A irrigação localizada caracteriza-se por aplicar água de forma direcionada, visando a umedecer apenas a área explorada pelo sistema de raízes da planta. Esta estratégia de aplicação localizada reduz a quantidade de água disponível para evaporação na superfície do solo, limita a infestação de ervas daninhas e economiza água por não irrigar áreas não cultivadas, principalmente quando se trata de culturas perenes, cujo espaçamento entre plantas faz com que grande parte da área cultivada não seja coberta pelo cultivo ([Silva et al., 1996](#)). Por outro lado, a aplicação freqüente de água possibilita a manutenção de altos teores de umidade no solo que, caso sejam adotadas técnicas adequadas de manejo de irrigação, favorece o desenvolvimento da planta em seu máximo potencial do ponto de vista do suprimento de água. A irrigação localizada é tipicamente representada pelos métodos conhecidos por gotejamento e microaspersão. Para mais detalhes sobre as características desse sistema de irrigação, seu funcionamento e suas técnicas de manejo, recomenda-se consulta a textos tradicionais sobre o assunto ([Karmeli & Keller, 1975](#); [Goldberg et al., 1976](#); [Olitto, 1977](#); [Nakayama & Bucks, 1986](#); [Bernardo, 1995](#)).

O sistema de irrigação localizada envolve uma série de componentes essenciais para seu funcionamento adequado, apresentando uma variedade considerável de possibilidades de disposição das linhas para distribuição da água na área irrigada. A Figura 11 ilustra uma disposição típica desse sistema de irrigação constituída de quatro setores, uma linha principal, quatro linhas de distribuição e um número de laterais suficientes para cobertura de cada setor irrigado. Esse esquema de distribuição é representativo tanto do gotejamento como da microaspersão.

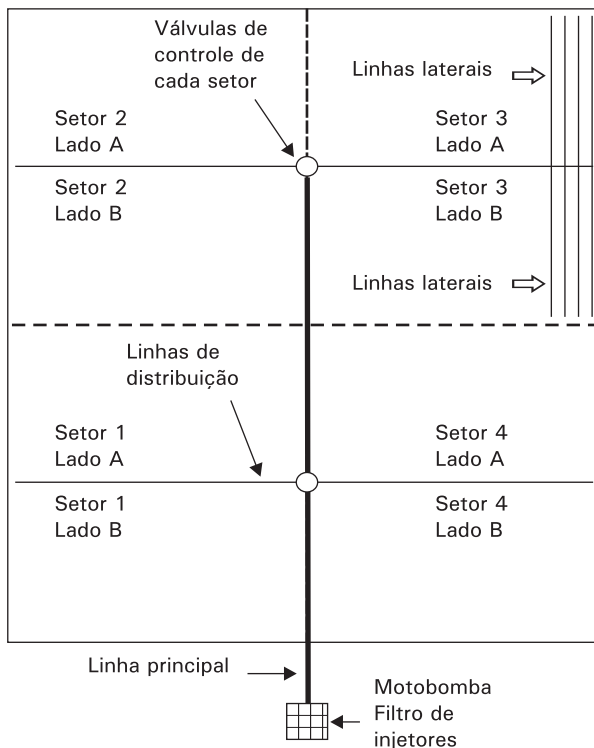


Figura 11. Disposição típica de um sistema de irrigação localizada, indicando seus principais componentes.

Basicamente a avaliação de desempenho da irrigação localizada consiste na coleta de água diretamente de emissores previamente selecionados para determinação da vazão aplicada ([Merriam & Keller, 1978](#); [Bralts, 1986](#)). É importante destacar que, do ponto de vista da avaliação de desempenho, não é necessário medir a vazão de todos os emissores ([Merriam & Keller, 1978](#)). Uma amostra representativa da variabilidade da vazão pode ser obtida selecionando-se um dos setores irrigados para avaliação, dando-se, sempre a, preferência para

aquele que melhor represente a pressão de serviço da unidade de irrigação em questão. A Figura 12 destaca o Setor 3 da unidade de irrigação ilustrada na [Figura 11](#) para servir de base em sua avaliação desempenho.

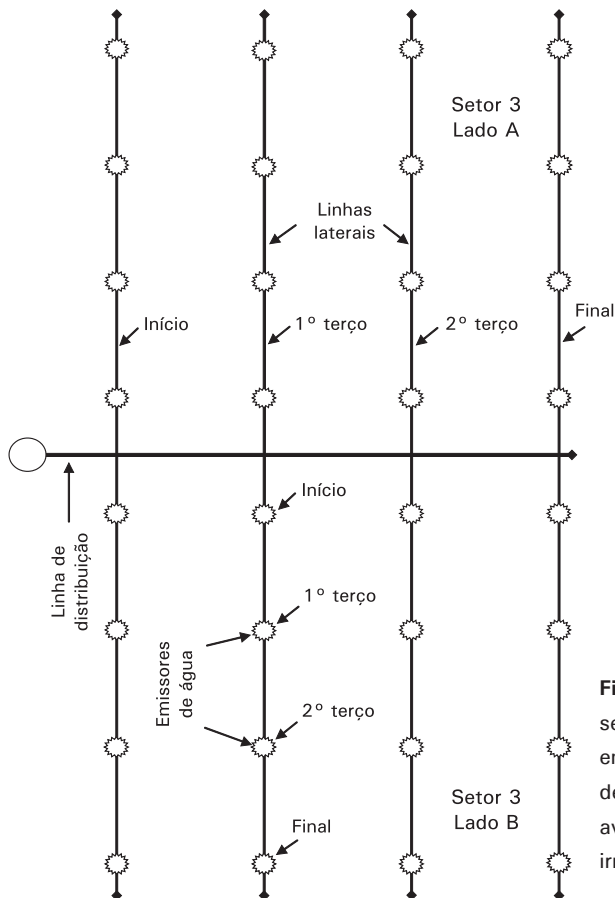


Figura 12. Esquema de seleção de linhas laterais e emissores de água para fins de coleta de água e avaliação de desempenho da irrigação localizada.

Além disso, entre as laterais que compõem o setor destacado para avaliação de desempenho, são selecionadas apenas as laterais de um dos lados (A ou B), situadas no início, no primeiro e segundo terço, e no final da linha de distribuição. De cada linha lateral são selecionados emissores que atendem as plantas localizadas no início, no primeiro e segundo terço e no final linha ([Merriam & Keller, 1978](#)). Desta forma, o conjunto de dados utilizado na avaliação de desempenho será constituído por apenas 16 valores de vazão. A [Tabela 2](#) ilustra um caso de coleta de vazão de um sistema de irrigação por microaspersão.

Tabela 2. Vazões coletadas (litros por hora) por microaspersor, nas posições especificadas de um setor irrigado, no lote 59, do projeto de irrigação Barreiras-Norte, Barreiras – BA.

Posição na linha de distribuição	Posição na linha lateral de irrigação			
	Início	1º terço	2º terço	Final
Início	38,30	38,10	37,30	35,70
1º terço	38,10	37,10	35,00	36,40
2º terço	37,80	36,90	37,10	36,30
Final	38,70	37,40	36,30	36,20

No caso específico do gotejamento, no qual normalmente a água é aplicada por mais de um emissor, sugere-se medir a vazão de pelos menos dois emissores adjacentes à planta selecionada, para se extrair uma média representativa da vazão aplicada naquela posição, conforme indicado nos dados da Tabela 3.

Tabela 3. Vazões coletadas (litros por hora) por gotejador, nas posições especificadas de um setor irrigado, operando com quatro emissores por planta, projetados cada um para fornecer uma vazão de 11,36 L/h com pressão de serviço de 2,2 kgf/cm². Nesse caso foram feitas medições de apenas dois micros adjacentes por planta.

Posição na linha de distribuição		Posição na linha lateral de irrigação			
		Início	1º terço	2º terço	Final
Início	Micro A	7,92	9,60	11,52	11,70
	Micro B	9,60	11,28	8,40	12,30
	Média	8,76	10,44	9,96	12,00
1º terço	Micro A	9,60	17,70	10,50	10,14
	Micro B	10,08	9,48	10,20	10,80
	Média	9,84	13,59	10,35	10,47
2º terço	Micro A	11,22	8,76	7,50	8,64
	Micro B	10,50	9,30	9,30	10,50
	Média	10,86	9,03	8,40	9,57
Final	Micro A	10,20	11,40	12,60	9,06
	Micro B	7,50	8,10	9,96	7,80
	Média	8,85	9,75	11,28	8,43

É importante destacar que nesta modalidade de irrigação, o que se pretende é distribuir a água de forma localizada, procurando umedecer parte do sistema radicular das plantas. Segundo [Merriam & Keller \(1978\)](#), em regiões áridas, o objetivo é proporcionar o umedecimento de 33% a 50% da área cultivada. Em regiões úmidas, onde a irrigação funciona como fornecimento suplementar de água, esta porcentagem pode ser reduzida em torno de 20%. Vale ressaltar que, essa porcentagem de área umedecida não deve ultrapassar 50% ou 60%, principalmente em se tratando de cultivos com espaçamentos grandes, como é o caso das mangueiras, videiras, coqueiros, cítrus, entre outros.

Convém salientar que nos casos da irrigação por microaspersão, quando se utiliza emissor de grande alcance, existe a tendência ao aproveitamento da área umedecida além do diâmetro da copa, com culturas intercalares, principalmente quando se trata de um cultivo perene em fase inicial de desenvolvimento. Nesse caso, é importante avaliar, também, a distribuição da água entre as linhas, utilizando os mesmos procedimentos de coleta aplicados na irrigação por aspersão convencional, procurando determinar o desempenho desta distribuição e, assim, decidir sobre a possibilidade efetiva de utilização de uma cultura intercalar em parte ou na totalidade da área disponível entre as linhas do plantio principal. Esta opção deve ser vista com reservas, evitando que a cultura intercalar concorra por mão-de-obra, água e nutrientes, com a cultura principal.

Análise dos Dados Coletados

O resultado da avaliação é importante para a tomada de decisão sobre a necessidade ou não de execução de medidas corretivas para melhoria da uniformidade de aplicação de água do sistema. Além disso, a informação sobre o padrão de distribuição de água do sistema de irrigação é essencial, para que seja possível estabelecer qual deverá ser o fator de adequação desejável a ser imposto sobre a lâmina média aplicada, para que o sistema irrigue de acordo com as necessidades da cultura otimizando seu resultado econômico. Dentre os vários trabalhos pioneiros, que foram desenvolvidos, visando a estabelecer relações entre a uniformidade de distribuição da água aplicada, seus efeitos sobre a eficiência de irrigação e a área adequadamente irrigada, destacam-se os estudos realizados por [Hart & Reynolds \(1965\)](#), [Solomon & Keller \(1978\)](#), [Peri et al. \(1979\)](#), [Norum et al. \(1979\)](#), [Walker \(1979\)](#), [Warrick \(1983\)](#) e [Warrick et al. \(1989\)](#).

Para melhor compreender como os parâmetros envolvidos na avaliação de desempenho de um sistema de irrigação se inter-relacionam, os valores de lâmina ou vazão coletados devem ser ordenados de forma decrescente, e associados à

área que cada coletor representa em relação à área total considerada na avaliação. Essa relação de área, tomada de forma cumulativa, varia de 0 a 1 e é adimensional. A Figura 13 ilustra um perfil de distribuição típico da água aplicada com pivô-central, mostrando um modelo ajustado aos dados observados e indicando as frações de áreas que receberam água em excesso e em deficiência em relação à média aplicada. Nesse perfil, a quantidade de água aplicada, em termos de volume, tanto em excesso como em deficiência em relação à média geral é exatamente a mesma.

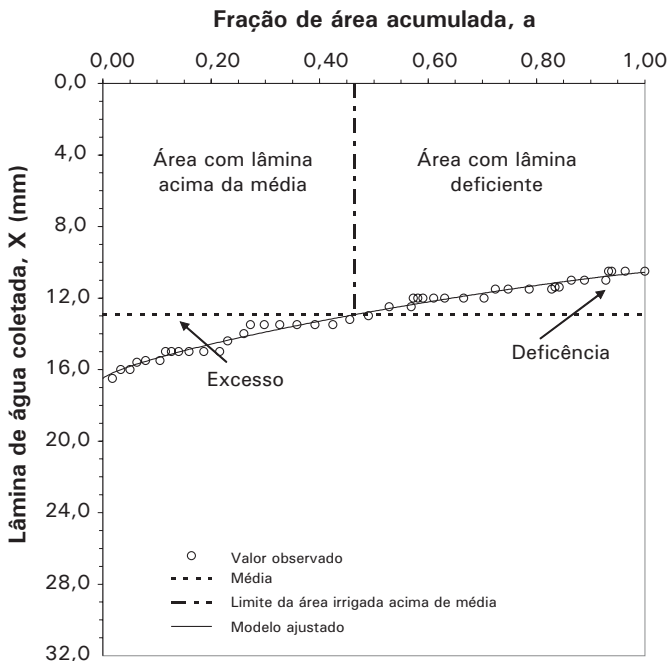


Figura 13. Perfil de distribuição de água aplicada, com as lâminas ordenadas de forma decrescente em função da fração de área irrigada, ilustrando as parcelas que receberam água em excesso e em deficiência.

Áreas representativas dos coletores

Para construção do perfil de distribuição da água coletada é muito importante compreender a representatividade da área de cada coletor. Em geral, procura-se dispor os coletores na área irrigada de modo que cada recipiente represente áreas iguais. Entretanto, existem casos em que essa condição não é possível de ser

atendida, como é o caso do sistema de irrigação por pivô-central, no qual os coletores mais distantes do ponto de rotação do equipamento representam frações de áreas maiores. Essas duas situações são analisadas a seguir.

Coletores representando áreas iguais

Esse é o caso mais comum de arranjo de coletores na área a ser avaliada, na qual cada coletor representa frações iguais da área irrigada. Considere o caso das lâminas de água coletadas para avaliação da irrigação por aspersão convencional ([Figura 6](#)), em que cada coletor representa uma área equivalente a 3 x 3 m. Nesta situação, a fração de área correspondente a cada coletor é igual a 0,0417, ou seja, representa a relação entre a área de uma malha de 9 m² e a área total avaliada, de 216 m². No caso da avaliação do autopropelido, cujos resultados das lâminas aplicadas são apresentados na [Tabela 1](#), ao todo são 33 coletores, espaçados igualmente de 3 em 3 m, de forma que cada coletor representa uma fração de área correspondente 1/33 avos da área avaliada, ou seja, 0,0303. Na [Tabela 2](#) estão apresentados os resultados da avaliação de uma área representativa de um sistema de irrigação por microaspersão, onde foram selecionados 16 microaspersores do Setor 3, lado A, para medição de vazão, seguindo o esquema ilustrado na [Figura 12](#). Nesse caso, cada microaspersor representa uma fração de área equivalente a 1/16 avos, ou seja, 0,0625.

Coletores representando áreas desiguais

Esse é o caso típico do sistema de irrigação por pivô-central, no qual os coletores são dispostos radialmente, a partir do ponto pivô, até cobrir toda a área de abrangência da lateral de aspersores ([Figura 10](#)). Segundo Am & Rosentreter (1989), os coletores devem ser espaçados uniformemente e localizados em linha reta com um espaçamento máximo equivalente a 30% da média do diâmetro molhado dos aspersores, não sendo recomendado espaçamentos superiores a 4,5m. É importante destacar que cada coletor representa áreas diferentes e crescentes a medida em que se afasta do ponto pivô. Esta condição determina a necessidade de utilização de um sistema de ponderação que dê maior peso aos coletores mais distantes do ponto pivô. Segundo [Heermann & Hein \(1968\)](#), a distância entre o coletor e o ponto pivô pode ser utilizada, adequadamente, como valor de ponderação na avaliação do desempenho desse sistema de irrigação. A [Figura 14](#) apresenta um esquema de disposição radial de coletores, igualmente espaçados, ilustrando as coroas circulares que cada um representa e suas respectivas distâncias do centro de rotação.

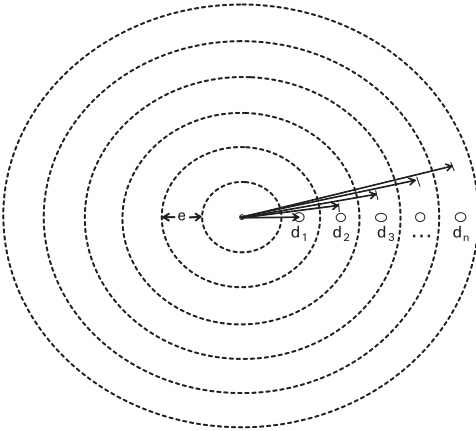


Figura 14. Esquema de posicionamento radial de coletores ($d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$) e o espaçamento entre eles, ilustrando os setores circulares que cada um representa, para avaliação da aplicação da água em sistemas irrigados por pivô-central.

Nesse esquema, a área representada pelo i -ésimo coletor pode ser expressa pela seguinte equação:

$$a_i = 2 \pi d_i e \quad (1)$$

onde i : representa um coletor qualquer na seqüência de 1 a n ; d_i : distância do i -ésimo coletor em relação ao ponto pivô; e : espaçamento constante entre coletores.

A área total a_T englobada pela seqüência de todos coletores ($d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$) pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$a_T = 2 \pi e \sum_{i=1}^n d_i \quad (2)$$

De modo que, a fração de área do i -ésimo coletor fa_i , em relação a área total avaliada, pode ser representada pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} fa_i &= \frac{2 \pi e d_i}{2 \pi e (d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n)} \\ &= \frac{d_i}{(d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n)} \end{aligned} \quad (3)$$

Da Equação 3 pode-se derivar a fração de área acumulada correspondente a k -ésima lâmina de água, em ordem decrescente, da seguinte maneira:

$$a_k = \frac{1}{(d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n)} \sum_{i=1}^k d_k \tag{4}$$

onde a distância d_1 , relativa ao primeiro coletor, deve ser sempre maior do que zero.

É importante destacar que ao se ordenar as lâminas de água de forma decrescente, a exemplo do que está apresentado na [Figura 13](#), aparentemente, perde-se a informação relativa à sua posição original na área avaliada. No entanto, sua representatividade em termos da área de domínio de cada coletor é mantida, pois para cada lâmina aplicada X_i existe uma fração de área associada fa_i , definida pela Equação 3, calculada em função da distância em que o coletor se encontrava originalmente em relação ao ponto pivô. Deve-se atentar para o fato de que a soma de todas as frações de área deve ser necessariamente igual à unidade e que as frações de área acumulada (Equação 4) variam na escala de 0 a 1.

A Tabela 4 mostra os valores utilizados na construção da [Figura 13](#), exemplificando o cálculo da fração de área (Equação 3), representada por cada coletor conforme sua distância em relação ao ponto pivô, e sua respectiva fração de área acumulada (Equação 4).

Tabela 4. Exemplo de cálculo da fração de área e sua respectiva fração de área acumulada, representada por cada coletor, com as lâminas ordenadas de forma decrescente, indicando as posições originais dos coletores.

Coletores		Lâmina ordenada X_i (mm)	Fração de área fa_i	Fração de área acumulada a_i
Ordem	Posição			
i	d_i (m)			
1	82	16,2	0,01792	0,01792
2	70	16,0	0,01530	0,03322
3	78	15,8	0,01705	0,05026
4	58	15,7	0,01267	0,06294
5	74	15,5	0,01617	0,07911
6	122	15,3	0,02666	0,10577
7	46	15,2	0,01005	0,11582
8	50	15,1	0,01093	0,12675
9	62	15,0	0,01355	0,14030
10	86	14,9	0,01879	0,15909

Continua...

Tabela 4. Continuação.

Coletores		Lâmina ordenada X_i (mm)	Fração de área fa_i	Fração de área acumulada a_i
Ordem i	Posição d_i (m)			
11	126	14,7	0,02753	0,18663
12	134	14,5	0,02928	0,21591
13	66	14,4	0,01442	0,23033
14	138	14,2	0,03016	0,26049
15	54	14,1	0,01180	0,27229
16	118	13,9	0,02579	0,29808
17	130	13,7	0,02841	0,32649
18	146	13,5	0,03191	0,35839
19	150	13,3	0,03278	0,39117
20	154	13,2	0,03365	0,42483
21	142	13,0	0,03103	0,45586
22	158	12,8	0,03453	0,49038
23	174	12,6	0,03802	0,52841
24	186	12,4	0,04065	0,56906
25	18	12,4	0,00393	0,57299
26	38	12,3	0,00830	0,58129
27	42	12,3	0,00918	0,59047
28	90	12,2	0,01967	0,61014
29	94	12,1	0,02054	0,63068
30	162	11,9	0,03540	0,66608
31	170	11,7	0,03715	0,70323
32	98	11,6	0,02142	0,72465
33	106	11,5	0,02316	0,74781
34	178	11,4	0,03890	0,78671
35	190	11,2	0,04152	0,82823
36	30	11,2	0,00656	0,83479
37	34	11,1	0,00743	0,84222
38	102	11,0	0,02229	0,86451
39	110	10,9	0,02404	0,88855
40	182	10,8	0,03977	0,92832
41	22	10,8	0,00481	0,93313
42	26	10,8	0,00568	0,93881
43	114	10,7	0,02491	0,96372
44	166	10,6	0,03628	1,00000

Modelagem da água distribuída

A utilização de uma função contínua para representação dos valores de lâmina ou vazão de água aplicada por um sistema de irrigação facilita, sobremaneira, o cálculo dos principais parâmetros necessários para avaliação de desempenho das irrigações. Existem vários modelos utilizados para o ajuste das lâminas ou vazão de água aplicada em função da área relativa que cada observação representa. [Hart & Reynolds \(1965\)](#) e [Hart & Heermann \(1976\)](#) utilizaram a distribuição estatística normal cumulativa para representar o perfil de aplicação da água, ordenada de forma decrescente em função da fração da área irrigada. [Chaudry \(1978\)](#) e [Karmeli \(1978\)](#) utilizaram, respectivamente, a distribuição gama e a função potencial para esta mesma finalidade. [Walker \(1979\)](#) desenvolveu uma série de relações matemáticas explícitas, as quais contribuíram para simplificar o cálculo dos parâmetros de desempenho da irrigação por aspersão, para isto utilizou a função de distribuição normal. [Warrick \(1983\)](#) adicionou as funções de distribuição lognormal, uniforme e beta, apresentando as relações matemáticas entre os parâmetros de desempenho para cada uma dessas distribuições estatísticas, incluindo as funções de distribuição normal e gama. É evidente que a qualidade de ajuste de cada uma dessas funções aos dados observados varia de acordo com o padrão de distribuição obtido, conforme ficou demonstrado nas ilustrações apresentadas por [Warrick et al. \(1989\)](#). [Silva & Hart \(1992\)](#) mostraram que a função de [Karmeli \(1978\)](#) é inadequada para o caso da irrigação deficiente, ou seja, quando parte da área considerada como objeto da irrigação, não recebe água e, em função disto, propuseram uma função de distribuição alternativa.

Formulação matemática proposta

Atualmente, com as facilidades computacionais das planilhas eletrônicas, outras funções de distribuição com maior número de parâmetros de ajuste, podem ser facilmente empregadas, aproximando cada vez os modelos às realidades observadas. Por exemplo, a utilização da rotina “Solver” ([Microsoft Corporation, 1994](#)) facilita bastante esta abordagem. Motivado por essas facilidades, esse trabalho apresenta uma nova função de distribuição para realização do ajuste do perfil das lâminas ou vazões aplicadas via irrigação pressurizada. A função proposta pode ser facilmente adaptada aos recursos de planilhas eletrônicas para a obtenção dos parâmetros de ajuste, ampliando, assim, as possibilidades de melhor ajuste ao representar a grande variedade de perfis de distribuição normalmente observadas nas avaliações de desempenho de sistemas de irrigação, a exemplo das apresentadas por [Warrick et al. \(1989\)](#).

A função proposta é descrita da seguinte maneira:

$$X = X_n + (X_m - X_n) (1 - a^n)^m \quad (5)$$

onde a: variável contínua, representando a fração de área acumulada (adimensional); X: lâmina de água ou vazão aplicada em função da fração de área acumulada; X_n e X_m parâmetros ajustados correspondentes, respectivamente, à lâmina ou vazão mínima e máxima da água aplicada; m e n: parâmetros adimensionais de ajuste.

De modo que, a forma explícita da fração de área acumulada toma o seguinte aspecto:

$$a = \left[1 - \left(\frac{X - X_n}{X_m - X_n} \right)^{1/m} \right]^{1/n} \quad (6)$$

Ajuste dos parâmetros do modelo

Para ajustar o modelo proposto a qualquer conjunto de dados proveniente da avaliação de desempenho de sistemas de irrigação é necessário utilizar um programa computacional com recursos de análise de regressão não-linear para determinação dos parâmetros (X_n , X_m , m e n) do modelo. O procedimento de ajuste é iterativo, ou seja, partindo-se de uma estimativa inicial, o processo de cálculo deverá em cada iteração melhorar essas estimativas até encontrar um conjunto de parâmetros que resultem na menor soma de quadrados entre os valores observados e calculados pelo modelo. Isto significa que o procedimento adotado deve minimizar a seguinte função-objetivo:

$$SQ = \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2 \quad (7)$$

onde SQ: soma de quadrados da diferença entre os valores observados e calculados; X_i : representa cada uma das n lâminas de água observadas; $\hat{X}_i$: a lâmina de água calculada pela Equação 5, correspondente à i-ésima observação.

Neste trabalho, será utilizada a rotina "Solver" da planilha eletrônica Excel ([Microsoft Corporation, 1994](#)) para calcular os parâmetros de ajuste do referido

modelo. Objetivando exercitar esse procedimento de uso da rotina “Solver”, serão utilizados os dados da Tabela 5, na qual os parâmetros de ajuste (X_n , X_m , m e n) da Equação 5 já se encontram devidamente, calculados.

Tabela 5. Exemplo de ajuste entre a fração de área acumulada e cada lâminas de água observada, indicando as posições originais de cada coletor, os parâmetros do modelo de ajuste com as respectivas soma de quadrados dos desvios.

X_m	X_n	n	m	SQ	
16,50	10,5652	0,76153	1,12830	2,428502	
Coletores			Lâminas (mm)		Quadrado dos
Ordem i	Posição d_i (m)	Acumuladas a_i (dec)	Observadas x_i	Calculadas $\hat{x}_i$	desvios $(x_i - \hat{x}_i)^2$
1	82	0,01792	16,5	16,19	0,0974
2	70	0,03322	16,0	16,00	0,0000
3	78	0,05026	16,0	15,82	0,0331
4	58	0,06294	15,6	15,69	0,0084
5	74	0,07911	15,5	15,54	0,0016
6	122	0,10577	15,5	15,30	0,0382
7	46	0,11582	15,0	15,22	0,0485
8	50	0,12675	15,0	15,13	0,0171
9	62	0,14030	15,0	15,02	0,0005
10	86	0,15909	15,0	14,88	0,0152
11	126	0,18663	15,0	14,67	0,1079
12	134	0,21591	15,0	14,46	0,2892
13	66	0,23033	14,4	14,36	0,0014
14	138	0,26049	14,0	14,16	0,0251
15	54	0,27229	13,5	14,08	0,3370
16	118	0,29808	13,5	13,91	0,1713
17	130	0,32649	13,5	13,74	0,0553
18	146	0,35839	13,5	13,54	0,0016
19	150	0,39117	13,5	13,35	0,0238
20	154	0,42483	13,5	13,15	0,1214
21	142	0,45586	13,2	12,98	0,0497
22	158	0,49038	13,0	12,79	0,0449
23	174	0,52841	12,5	12,59	0,0073

Continua...

Tabela 5. Continuação.

X_m	X_n	n	m	SQ	
16,50	10,5652	0,76153	1,12830	2,428502	
Ordem i	Coletores		Lâminas (mm)		Quadrado dos desvios $(x_i - \hat{x}_i)^2$
	Posição d_i (m)	Acumuladas a_i (dec)	Observadas x_i	Calculadas $\hat{x}_i$	
24	186	0,56906	12,5	12,38	0,0156
25	18	0,57299	12,0	12,36	0,1261
26	38	0,58129	12,0	12,31	0,0980
27	42	0,59047	12,0	12,27	0,0712
28	90	0,61014	12,0	12,17	0,0285
29	94	0,63068	12,0	12,07	0,0046
30	162	0,66608	12,0	11,90	0,0104
31	170	0,70323	12,0	11,72	0,0760
32	98	0,72465	11,5	11,63	0,0160
33	106	0,74781	11,5	11,52	0,0005
34	178	0,78671	11,5	11,35	0,0217
35	190	0,82823	11,5	11,18	0,1036
36	30	0,83479	11,4	11,15	0,0619
37	34	0,84222	11,4	11,12	0,0779
38	102	0,86451	11,0	11,03	0,0010
39	110	0,88855	11,0	10,94	0,0038
40	182	0,92832	11,0	10,79	0,0439
41	22	0,93313	10,5	10,77	0,0747
42	26	0,93881	10,5	10,75	0,0642
43	114	0,96372	10,5	10,67	0,0286
44	166	1,00000	10,5	10,57	0,0043

Antes de acionar a rotina “Solver”, a referida planilha de dados (Tabela 5) já deve se encontrar aberta para utilização. Para selecionar a rotina “Solver”, acesse, na barra superior de ferramentas da planilha Excel, a opção Ferramentas e escolha, na barra de rolagem, a rotina “Solver”. Caso esta rotina não esteja disponível, procure nesta mesma barra de rolagem a opção “Suplementos” para habilitá-la. Se ela não aparecer como disponível para habilitação, então será necessário utilizar o disco de instalação do programa Excel para adicionar esta opção. Uma vez concluída estas etapas, acione a rotina Solver para obter as telas mostradas na [Figura 15](#):

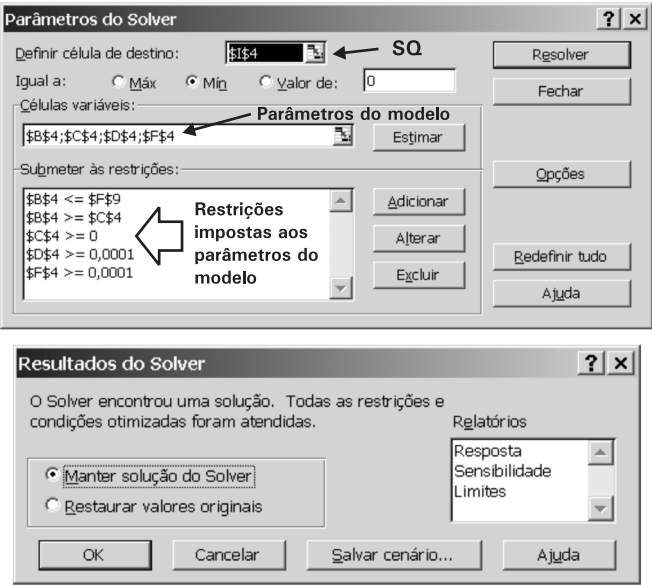


Figura 15. Telas da rotina “Solver”, usadas no processo de otimização dos parâmetros de ajuste do modelo proposto e na obtenção da representação analítica das lâminas de água aplicada em função da fração de área acumulada.

Na tela superior (Figura 15), encontram-se indicadas e preenchidas as informações necessárias para a utilização da rotina “Solver”. É importante salientar alguns aspectos da tela “Parâmetros do Solver”, para melhor domínio na utilização dessa rotina. A célula indicada como destino, a qual, nesse caso, está selecionada como a “\$I\$4”, deve conter a soma dos quadrados dos desvios, verificada entre os dados observados e os valores calculados pelo modelo (Equação 5), calculada de acordo com a Equação 7. Como o objetivo da regressão é minimizar essa soma de quadrados SQ, então, deve-se selecionar a opção “Mín” da referida tela superior (Figura 15). No espaço reservado para as células variáveis, estão exatamente as células (\$B\$4; \$C\$4; \$D\$4; \$F\$4), as quais contém, respectivamente, os valores iniciais atribuídos a X_m , X_n , n e m. No espaço reservado para restrições às variáveis do modelo, estão indicadas as seguintes informações: a primeira restrição estabelece que X_m seja menor ou igual ao maior valor do conjunto de observações X_i ; a segunda restrição impõe ; a terceira restrição determina $X_n \geq 0$; a quarta e quinta restrições

forçam n e m a admitirem apenas valores positivos (por exemplo, $n \geq 0,001$ e $m \geq 0,001$).

Depois dessas verificações, basta pressionar o botão “Resolver” e a rotina “Solver” será acionada, o procedimento interno de regressão não-linear entrará em ação, indicando, na barra inferior da tela do programa Excel, a evolução do processo de otimização, no qual SQ será reduzido a um valor menor possível para o conjunto de dados considerados. Ao finalizar esse procedimento, a tela inferior ([Figura 15](#)) apresentará que o processo foi bem-sucedido e a rotina encontrou uma solução, atendendo a todas as restrições e condições otimizadas. Caso aconteça algum erro na montagem das informações requeridas na tela superior ([Figura 15](#)), o programa apresentará uma mensagem de erro e o usuário deverá verificar o motivo de tal ocorrência.

Se a operação foi bem sucedida, conforme indica a tela inferior ([Figura 15](#)), basta pressionar o botão “OK” e o processo de otimização estará concluído. É importante salientar que, ao se tratar de um processo de regressão não-linear, é possível que a solução encontrada não seja, ainda, a solução verdadeira. Por isso, recomenda-se acionar o procedimento da rotina “Solver”, mais de uma vez, para certificar de que os parâmetros encontrados se mantêm constantes, indicando, portanto, que a solução encontrada representa o mínimo global esperado.

Além disso, como em todo processo de minimização não-linear, os valores iniciais, atribuídos pelo usuário aos parâmetros a serem ajustados, devem ser próximos da solução esperada, para que o algoritmo iterativo conduza, realmente, ao mínimo global. Por isso, sugere-se que sejam adotadas como estimativas iniciais para X_m e X_n , os respectivos valores máximos e mínimos do conjunto de dados observados e, para as estimativas, tanto de n como de m , o valor de 0,5. Nesse exemplo, os valores encontrados aos parâmetros de ajuste foram os seguintes: $X_m = 16,50$; $X_n = 10,5652$; $n = 0,76153$; $m = 1,12830$, para uma soma de quadrados de erros residuais, $SQ = 2,42850221$ ([Tabela 5](#)).

Limite da área adequadamente irrigada

Reportando-se à [Figura 13](#), o limite da área adequadamente irrigada está representado pela linha vertical tracejada que divide a fração de área acumulada em duas partes: à esquerda da linha, o perfil de distribuição excede a média (linha tracejada horizontal), enquanto, à direita, ele é inferior. As duas áreas, de

excesso e de deficiência, são exatamente iguais. O valor da fração de área acumulada, em que ocorre esta divisão, é representado por a_L e pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$a_L = \left[1 - \left(\frac{\bar{X} - X_n}{X_m - X_n} \right)^{1/m} \right]^{1/n} \quad (8)$$

A Equação 8 é obtida, substituindo o valor de X da Equação 5 por seu valor médio, o qual é determinado pela seguinte fórmula:

$$\bar{X} = \int_0^1 X \, da \quad (9)$$

A solução da Equação 9, que se encontra deduzida em detalhes no Anexo (Equações 58-68), é a seguinte:

$$\bar{X} = X_n + (X_m - X_n) \left(\frac{m}{1 + mn} \right) \frac{\exp \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} \right) \right] \exp [\text{LNGAMA}(m)]}{\exp \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} + m \right) \right]} \quad (10)$$

onde $\exp[]$: função exponencial, na base neperiana, de um argumento qualquer; $\text{LNGAMA}()$: função logaritmo neperiano da função Gama para um número positivo e não nulo. Essas expressões fazem parte do rol de funções contidas na referida planilha Excel.

Exemplificando o cálculo da média $\bar{X}$ referente aos dados parametrizados da avaliação de desempenho indicada na [Tabela 5](#) ($X_m = 16,50$; $X_n = 10,5652$; $n = 0,76153$; $m = 1,12830$), tem-se o seguinte resultado:

$$\begin{aligned} \bar{X} = & 10,5652 + (16,50 - 10,5652) \left(\frac{1,1283}{1 + (1,1283)(0,76153)} \right) * \\ & \frac{\exp \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{1,1283} \right) \right] \exp [\text{LNGAMA}(0,76153)]}{\exp \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{1,1283} + 0,76153 \right) \right]} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\bar{X} = 12,94$$

Introduzindo essa média na Equação 8 e considerando os parâmetros já ajustados da [Tabela 5](#), o valor de a_L resulta no seguinte:

$$a_L = \left[1 - \left(\frac{12,94 - 10,5652}{16,50 - 10,5652} \right)^{1/1,1283} \right]^{1/0,76153} \quad (12)$$

$$= 0,4623$$

Ao utilizar a rotina “Solver”, para o ajuste dos dados pontuais observados, que formam o perfil de distribuição de água, ao modelo proposto pela Equação 5, o programa calcula, automaticamente, o valor de a_L , usando a Equação 8.

Parâmetros de análise de desempenho da irrigação

Tomando por base, ainda, os resultados apresentados na [Figura 13](#), pode-se afirmar que ali se encontram todos os elementos necessários para a análise de desempenho do referido sistema de irrigação avaliado. Suponha que a lâmina média calculada representa exatamente a quantidade de água requerida para suprir a deficiência hídrica na zona de raízes da planta. Nesse caso, a porção do perfil da água que ultrapassa a média calculada deve ser considerada como excedente, indicando, assim, que o volume de água aplicado até o limite de a_L foi excessivo, sendo representado por $\forall_E$. Por outro lado, a porção do perfil, depois do limite de a_L , que fica entre a média (linha tracejada) e a lâmina aplicada (modelo ajustado), deve ser considerada como deficiente, indicando que o volume de água foi aquém do necessário, sendo representado por $\forall_D$. O volume de água armazenado na área delimitada entre a linha média tracejada e o eixo das abscissas é considerado útil, sendo representado por $\forall_U$. Desta forma, a soma dos volumes $\forall_E$ e $\forall_U$ representa volume total de água aplicado ao solo $\forall_A$ que é exatamente igual ao $\bar{X}$ integrado sobre toda fração de área acumulada.

Depois dessas definições, fica claro que existe um estreito relacionamento entre a uniformidade de distribuição da água aplicada, a fração da área adequadamente irrigada e a eficiência de aplicação, assumindo que o excedente de água aplicada está fora da zona de utilidade da planta. Todos esses parâmetros, essenciais na análise de desempenho da irrigação, são detalhados a seguir.

Medidas de uniformidade

A uniformidade de aplicação de água é o indicador de desempenho que reflete o grau de variação da água aplicada em uma dada irrigação. Quanto mais uniforme for a distribuição da água aplicada pelo sistema de irrigação, melhor será seu

desempenho. Para avaliação desse parâmetro, são normalmente empregados dois índices: o coeficiente de uniformidade de Christiansen ([Christiansen, 1942](#)) e o coeficiente de uniformidade de distribuição ([Davis, 1966](#)). Existem, ainda, outros coeficientes de uniformidade ([Bralts, 1986](#)) que podem ser empregados na avaliação de desempenho de sistemas de irrigação, os quais são baseados em parâmetros estatísticos comuns, como, por exemplo, o coeficiente de variação ([Wilcox & Swailes, 1947](#)) e são conhecidos como coeficientes de uniformidade estatísticos. No entanto, conforme afirmam [Hart et al \(1979\)](#), é suficiente utilizar apenas um indicador de uniformidade na avaliação de desempenho da irrigação.

Coeficiente de uniformidade Christiansen (CUC)

Esse índice expressa o grau de variação existente entre os desvios absolutos, obtidos entre a diferença de cada valor observado de um conjunto de medidas de lâmina de água ou vazão aplicada e a média geral desse conjunto, podendo ser definido, em termos gerais, da seguinte forma ([Christiansen, 1942](#)):

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N |X_i - \bar{X}| \right) / N}{\bar{X}} \right] \quad (13)$$

onde N: número de observações realizadas e X_i : lâmina ou vazão coletada correspondente a cada observação i .

A média aritmética dos valores correspondentes ao conjunto total das N observações é a seguinte:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (14)$$

Nesta definição, cada lâmina ou vazão coletada é considerada como sendo representativa de subáreas iguais da área irrigada.

Exemplificando, com os dados de vazão coletados em um sistema de irrigação por microaspersão, cujos valores são indicados na [Tabela 2](#), o cálculo do valor do CUC, correspondente aos valores pontuais observados, é realizado aplicando o que preceitua a Equação 13, conforme indicam os resultados apresentados na [Tabela 6](#).

Tabela 6. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), correspondente aos valores pontuais das vazões coletadas por microaspersor, no lote 59, do projeto de irrigação Barreiras-Norte, Barreiras – BA.

Ordem dos coletores	Vazão coletada	$X_i - \bar{X}$
i	$X_i \text{ (L/h)}$	
1	38,3	1,26
2	38,1	1,03
3	37,3	0,26
4	35,7	1,38
5	38,1	1,07
6	37,1	0,09
7	35,0	2,01
8	36,4	0,61
9	37,8	0,72
10	36,9	0,12
11	37,1	0,03
12	36,3	0,76
13	38,7	1,64
14	37,4	0,40
15	36,3	0,73
16	36,2	0,88
Média	37,0	0,81

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{0,81}{37,0} \right] = 97,8\%$$

O alto valor de CUC encontrado, 97,8%, indica que o sistema está funcionando com excelente grau de uniformidade. É claro que os outros indicadores de desempenho, relacionados com os índices de eficiência, ainda precisam ser analisados para uma conclusão definitiva sobre o padrão de desempenho desta microaspersão.

O cálculo do CUC pode ser também realizado por meio da utilização do perfil de distribuição modelado, ao invés dos dados pontuais observados, considerando que a média dos desvios absolutos $|\bar{D}|$ pode ser obtida, empregando a seguinte definição proposta por [Warrick \(1983\)](#):

$$|\bar{D}| = \int_0^{a_L} (X - \bar{X}) da + \int_{a_L}^1 (\bar{X} - X) da \quad (15)$$

É importante ressaltar que a primeira integral representa exatamente o volume de água excedente ∇_E , enquanto a segunda integral representa o volume de água deficiente ∇_D , os quais nesse caso são exatamente iguais. Usando o valor médio $\bar{X}$, definido pela Equação 10, o CUC pode ser facilmente obtido com a definição geral dada na Equação 13.

A solução da Equação 15, que se encontra deduzida em detalhes no Anexo (Equações 69-81), é a seguinte:

$$|\bar{D}| = \text{DISTF} \left[f; 2(m+1); 2/n \right] \left(\frac{m}{1+mn} \right) \frac{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} \right) \right] \text{EXP} [\text{LNGAMA}(m)]}{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} + m \right) \right]} - \bar{X} a_L \quad (16)$$

onde o valor de f é dado pela seguinte Equação 17:

$$f = \frac{1}{n+mn} \left(\frac{1-a_L^n}{a_L^n} \right) \quad (17)$$

Para exemplificar a aplicação da Equação 16 no cálculo do CUC, serão utilizados os parâmetros de ajuste do perfil de distribuição relativo aos dados de vazão da Tabela 6, que se encontram, também, ilustrados na [Figura 16](#).

O perfil foi modelado seguindo a mesma sistemática descrita, anteriormente, na abordagem sobre o ajuste dos parâmetros do modelo. Na [Tabela 7](#) são apresentados os resultados da parametrização realizada, aplicando a rotina "Solver", no conjunto de dados da microaspersão avaliada acima. A soma de quadrados dos desvios SQ foi de apenas 0,231427, indicando um excelente grau de ajuste do modelo aos dados observados.

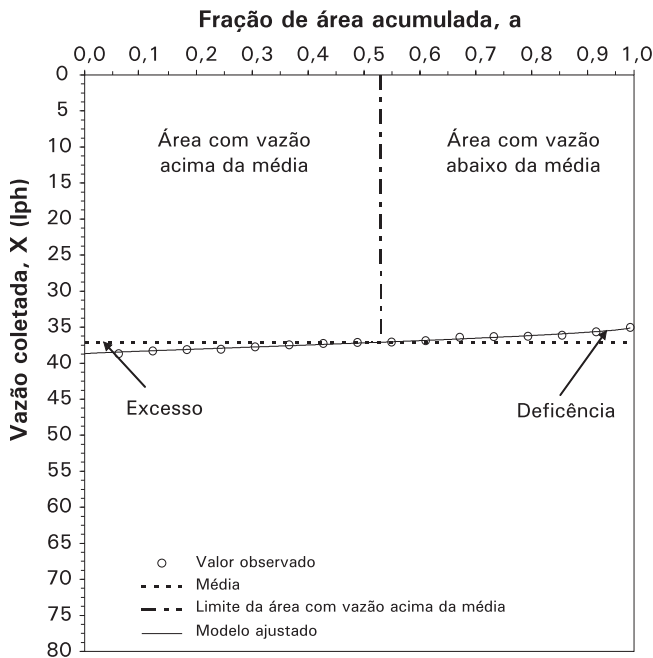


Figura 16. Perfil de distribuição das vazões coletadas em cada microaspersor, no lote 59, do projeto de irrigação Barreira-Norte, Barreiras – BA, ilustrando as áreas que receberam água em excesso e em deficiência.

Tabela 7. Exemplo de ajuste entre fração de área acumulada e as vazões observadas na avaliação da microaspersão, no lote 59, do projeto de irrigação Barreira-Norte, Barreiras-BA.

Parâmetros do modelo				
X_m	X_n	n	m	SQ
38,67	35,09	0,8645	0,6561	0,231427
Coletores		Vazões (L/h)		Quadrado dos
Ordem i	Acumulada a_i (dec)	Observadas x_i	Calculadas $\hat{x}_i$	desvios $(x_i - \hat{x}_i)^2$
1	0,06250	38,67	38,46	0,0472
2	0,12500	38,30	38,27	0,0005
3	0,18750	38,11	38,10	0,0001

Continua...

Tabela 7. Continuação.

Parâmetros do modelo				
X_m	X_n	n	m	SQ
38,67	35,09	0,8645	0,6561	0,231427
Coletores		Vazões (L/h)		Quadrado dos desvios $(x_i - \hat{x}_i)^2$
Ordem i	Acumulada a_i (dec)	Observadas x_i	Calculadas $\hat{x}_i$	
4	0,25000	38,07	37,92	0,0218
5	0,31250	37,76	37,75	0,0001
6	0,37500	37,44	37,57	0,0173
7	0,43750	37,29	37,40	0,0105
8	0,50000	37,13	37,22	0,0074
9	0,56250	37,07	37,03	0,0018
10	0,62500	36,92	36,84	0,0064
11	0,68750	36,43	36,63	0,0426
12	0,75000	36,31	36,42	0,0121
13	0,81250	36,27	36,19	0,0073
14	0,87500	36,15	35,93	0,0502
15	0,93750	35,66	35,62	0,0010
16	1,00000	35,02	35,09	0,0050

Nesse exemplo, o cálculo dos desvios absolutos $|\overline{D}|$, referente aos dados parametrizados da avaliação de desempenho indicada na Tabela 7 ($X_m = 38,67$; $X_n = 35,0942$; $n = 0,8645$; $m = 0,6561$), necessita dos seguintes valores:

$$\begin{aligned} \overline{X} &= 35,0942 + (38,67 - 35,0942) \left(\frac{0,6561}{1 + (0,8645)(0,6561)} \right) * \\ &\frac{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{0,8645} \right) \right] \text{EXP} [\text{LNGAMA}(0,6561)]}{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{0,8685} + 0,6561 \right) \right]} \end{aligned} \tag{18}$$

$\overline{X} = 37,14$

A média calculada diretamente com os dados observados foi de 37,0 (Tabela 6), a qual foi muito próxima da média obtida a partir do perfil modelado (Equação 18).

$$a_L = \left[1 - \left(\frac{37,14 - 35,0942}{38,67 - 35,0942} \right)^{1/0,6561} \right]^{1/0,8645} \quad (19)$$

$$= 0,5247$$

$$f = \frac{1}{0,8645 + (0,6561)(0,8645)} \left(\frac{1 - (0,5247)^{0,8645}}{(0,5247)^{0,8645}} \right) \quad (20)$$

$$= 0,52126$$

$$|\bar{D}| = \text{DISTF}[0,52126; 2(0,6561 + 1); (2/0,8645)] \left(\frac{0,6561}{1 + (0,6561)(0,8645)} \right) * \quad (21)$$

$$\frac{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{0,8645} \right) \right] \text{EXP} [\text{LNGAMA}(0,6561)]}{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{0,8645} + 0,6561 \right) \right]} - (37,14)(0,573)$$

$$= 0,7566$$

A média absoluta dos desvios calculada diretamente dos dados observados foi de 0,81 (Tabela 6) enquanto essa mesma média calculada segundo o modelo foi de 0,7566 (Equação 21).

Finalmente, tem-se o seguinte valor de CUC, calculado de acordo com o modelo (Equação 13):

$$\text{CUC} = 100 \times \left(1 - \frac{0,7566}{37,14} \right) \quad (22)$$

$$= 97,96\%$$

Esse resultado também é bem próximo do valor de CUC = 97,8%, calculado diretamente dos dados observados.

No caso do sistema de irrigação por pivô-central, no qual os valores da água coletada são obtidos ao longo de uma ou mais linhas radiais, em que cada observação representa uma subárea de tamanho crescente a partir do ponto pivô, o valor de CUC deve ser determinado aplicando um sistema de ponderação no qual as distâncias de cada coletor ao ponto pivô são tomadas como pesos. Para incorporar esse sistema de pesos na Equação 13, [Heermann & Hein \(1968\)](#) propuseram a seguinte expressão:

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\frac{\sum_{i=1}^N d_i |X_i - \bar{X}|}{\sum_{i=1}^N d_i}}{\bar{X}} \right] \quad (23)$$

e d_i : representa a distância em que um dado coletor i se encontra em relação ao ponto de rotação do pivô; os outros termos já foram definidos anteriormente. Nesta Equação 23, a média geral ponderada e a média absoluta dos desvios são calculadas, tendo como pesos os valores de d_i .

Nesse caso, o valor de $\bar{X}$ é calculado da seguinte maneira:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i d_i}{\sum_{i=1}^N d_i} \quad (24)$$

Para melhor compreensão dessa aplicação, o seguinte exemplo ilustrado na [Tabela 8](#) será utilizado para o cálculo CUC ponderado. Na [Tabela 8](#), as lâminas observadas estão ordenadas de forma decrescente, no entanto, as posições em que elas foram coletadas no campo, foram mantidas e utilizadas como fatores de ponderação.

Tabela 8. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) correspondente aos valores de lâminas coletadas em pivô-central.

Ordem i	Posição d_i (m)	Lâmina X_i (mm)	$X_i d_i$	d_i	$X_i - \frac{\sum_{i=1}^N X_i d_i}{\sum_{i=1}^N d_i}$
1	82	16,50	1353,0	293,23	
2	70	16,00	1120,0	215,32	
3	78	16,00	1248,0	239,93	
4	58	15,60	904,8	155,21	
5	74	15,50	1147,0	190,62	
6	122	15,50	1891,0	314,27	
7	46	15,00	690,0	95,50	
8	50	15,00	750,0	103,80	
9	62	15,00	930,0	128,71	
10	86	15,00	1290,0	178,54	
11	126	15,00	1890,0	261,58	
12	134	15,00	2010,0	278,18	
13	66	14,40	950,4	97,42	
14	138	14,00	1932,0	148,49	
15	54	13,50	729,0	31,10	
16	118	13,50	1593,0	67,97	
17	130	13,50	1755,0	74,88	
18	146	13,50	1971,0	84,10	
19	150	13,50	2025,0	86,40	
20	154	13,50	2079,0	88,70	
21	142	13,20	1874,4	39,19	
22	158	13,00	2054,0	12,01	
23	174	12,50	2175,0	73,78	
24	186	12,50	2325,0	78,86	
25	18	12,00	216,0	16,63	
26	38	12,00	456,0	35,11	
27	42	12,00	504,0	38,81	
28	90	12,00	1080,0	83,16	
29	94	12,00	1128,0	86,86	
30	162	12,00	1944,0	149,69	
31	170	12,00	2040,0	157,08	

Continua...

Tabela 8. Continuação.

Ordem i	Posição d _i (m)	Lâmina X _i (mm)	X _i d _i	d _i $\left X_i - \frac{\sum_{i=1}^N X_i d_i}{\sum_{i=1}^N d_i} \right $
32	98	11,50	1127,0	139,55
33	106	11,50	1219,0	150,94
34	178	11,50	2047,0	253,47
35	190	11,50	2185,0	270,56
36	30	11,40	342,0	45,72
37	34	11,40	387,6	51,82
38	102	11,00	1122,0	196,25
39	110	11,00	1210,0	211,64
40	182	11,00	2002,0	350,17
41	22	10,50	231,0	53,33
42	26	10,50	273,0	63,02
43	114	10,50	1197,0	276,34
44	166	10,50	1743,0	402,38
Soma:	4576	-	59140,2	6370,31
$\bar{X} = \frac{59140,2}{4576} = 12,92$ $\bar{d} = \frac{6370,31}{4576} = 1,392$ $CUC = 100 \left(1 - \frac{1,392}{12,92} \right) = 89,17\%$				

Nesse exemplo, os parâmetros encontrados (Tabela 5) foram os seguintes: (X_m = 16,50; X_n = 10,5652; n = 0,76153; m = 1,1283), os quais introduzidos nas Equações 8, 10, 16 e 17 geram os respectivos valores de: a_L = 0,556; $\bar{X} = 12,94$; $|\bar{D}| = 1,383$ e f = 0,4932. Desse resultado, calcula-se o valor de CUC = 89,31% (Equação 13). Os resultados correspondentes aos valores obtidos diretamente dos dados observados foram os seguintes: $\bar{X} = 12,92$; $|\bar{D}| = 1,392$ e CUC = 89,17% (Tabela 8). Esses valores são bem próximos dos resultados obtidos com o perfil modelado, indicando ter sido muito bom o ajuste do modelo proposto aos dados coletados.

Coeficiente uniformidade de distribuição (CUD)

Esse índice expressa a relação entre a média do quartil inferior das lâminas ou vazões aplicadas e a média geral. Ele pode ser expresso, de maneira geral, pela seguinte definição:

$$CUD = 100 \left(\frac{\frac{\sum_{i=N_q}^N X_i}{N_q}}{\frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}} \right) \quad (25)$$

onde N_q : número de ordem correspondente ao inteiro mais próximo do início do quartil inferior; X_i : lâmina ou vazão coletada correspondente aos valores contidos no quartil inferior.

Um exemplo de cálculo desse indicador de desempenho está apresentado na Tabela 9, com os mesmos dados da [Tabela 2](#), no qual o quartil inferior inicia no coletor de ordem nº 12.

Esse conceito de uniformidade é semelhante ao coeficiente de uniformidade de emissão proposto por [Keller & Karmeli \(1974\)](#) para avaliação de desempenho da irrigação localizada, para o qual eles tomaram a vazão dos emissores como unidade de medida.

Tabela 9. Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) correspondente aos valores das vazões coletadas por microaspersor, no lote 59, do projeto de irrigação Barreiras-Norte, Barreiras – BA.

Ordem dos coletores i	Vazões ordenadas (L/h)	Vazões do quartil inferior X_i (L/h)
1	38,7	
2	38,3	
3	38,1	
4	38,1	
5	37,8	
6	37,4	
7	37,3	
8	37,1	
9	37,1	

Continua...

Tabela 9. Continuação.

Ordem dos coletores i	Vazões ordenadas (L/h)	Vazões do quartil inferior X _i (L/h)
10	36,9	
11	36,4	
12	36,3	36,3
13	36,3	36,3
14	36,2	36,2
15	35,7	35,7
16	35,0	35,0
Média:	37,0	35,9
$CUD = 100 \left(\frac{35,9}{37,0} \right) = 97,0\%$		

O valor de CUD de 97,0%, bem próximo do valor de CUC de 97,8%, é bastante elevado, indicando que o perfil de distribuição das vazões aplicadas é bem uniforme e que o sistema possui alto desempenho. No entanto, é importante destacar que os outros indicadores de desempenho, relacionados com os índices de eficiência e a área adequadamente irrigada, precisam ser analisados para definir em quanto a vazão média deve ser aumentada ou reduzida, de forma que o percentual de área adequadamente irrigada seja compatível às demandas da cultura e ao retorno esperado pelo produtor.

O cálculo do CUD também pode ser realizado a partir do perfil de distribuição ajustado. Para isto, utiliza-se a média do quartil inferior, a qual pode, segundo [Warrick \(1983\)](#), ser calculada pela equação 26 e a média geral (equação 10).

$$\overline{X}_q = 4 \int_{3/4}^1 X \, da \tag{26}$$

Desenvolvendo-se a equação 26, cuja demonstração se encontra detalhada no Anexo (Equações 82-83), obtém-se:

$$\bar{X}_q = X_n + 4(X_m - X_n) \left(\frac{m}{1+mn} \right) \cdot \frac{\exp \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} \right) \right] \exp [\text{LNGAMA} (m)]}{\exp \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} + m \right) \right]} \cdot \{1 - \text{DISTF}[f; 2(m+1); 2/n]\} \quad (27)$$

na qual $\text{DISTF}[\]$ é a função da planilha Excel que retorna um valor da distribuição F sujeita aos graus de liberdade $2(m+1)$ e $2/n$, para um valor determinado pela seguinte equação:

$$f = \frac{1}{n+mn} \left[\frac{1 - (0,75)^m}{(0,75)^m} \right] \quad (28)$$

O cálculo do CUD com o perfil de distribuição proposto será exemplificado com os dados da [Tabela 7](#), relativos à avaliação de uma irrigação por microaspersão. A média geral para esse caso já se encontra determinada pela Equação 18, resultando em $\bar{X} = 37,14$. A média do quartil inferior desse exemplo (Tabela 7), considerando seus respectivos parâmetros de ajuste ($X_m = 38,67$; $X_n = 35,0942$; $n = 0,8645$; $m = 0,6561$), pode ser determinada utilizando a seqüência de cálculos, usando as Equações 27 e 28, da seguinte maneira:

$$f = \frac{1}{(0,8645) + (0,6561)(0,8645)} \left[\frac{1 - (0,75)^m}{(0,75)^m} \right] = 0,19722 \quad (29)$$

De modo que a média do quartil inferior para o referido exemplo é a seguinte:

$$\begin{aligned} \bar{X}_q &= 35,0942 + 4(38,67 - 35,0942) \left(\frac{0,6561}{1 + (0,6561)(n)0,8645} \right) \cdot \\ &\quad \frac{\exp \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{0,8645} \right) \right] \exp [\text{LNGAMA} (0,6561)]}{\exp \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{0,8645} + 0,6561 \right) \right]} \cdot \\ &\quad \{1 - \text{DISTF}[0,19722; 2(0,6561+1); 2/0,8645]\} \\ &= 35,99 \end{aligned} \quad (30)$$

Finalmente, o valor de CUD para o caso estudado da microaspersão calculado pela Equação 25, é o seguinte:

$$\begin{aligned} \text{CUD} &= 100 \times \left(\frac{35,99}{37,14} \right) \\ &= 96,89\% \end{aligned} \quad (31)$$

Esse valor de CUD, 96,89%, é bem próximo do CUD calculado diretamente a partir dos valores observados que foi de 97,0% ([Tabela 9](#)), denotando um excelente ajuste entre os valores de vazão coletada e seus respectivos valores calculados pelo modelo proposto (Equação 5).

Os mesmos procedimentos empregados para o cálculo do CUC ponderado em relação ao pivô-central também existem para o CUD ponderado, cuja expressão, desenvolvida a partir da Equação 25, transforma-se em:

$$\text{CUD} = 100 \left(\frac{\frac{\sum_{i=N_q}^N d_i X_i}{\sum_{i=N_q}^N d_i}}{\frac{\sum_{i=1}^N d_i X_i}{\sum_{i=1}^N d_i}} \right) \quad (32)$$

Para exemplificar o cálculo desse indicador, utilizando esta formulação, serão utilizados os mesmos dados de lâminas coletadas em pivô-central, os quais são processados da seguinte maneira:

O cálculo do CUD, utilizando o perfil de distribuição modelado para o caso do pivô, segue os mesmos passos adotados no cálculo do CUD da microaspersão. Nesse caso, a ponderação já está automaticamente considerada no cálculo das frações de área acumulada, conforme se encontra demonstrado na [Tabela 5](#). A média geral é determinada pela Equação 10, é igual a 12,94 (equação 11). A média do quartil inferior é determinada pela Equação 29, considerando os parâmetros: $X_m = 16,50$; $X_n = 10,5652$; $n = 0,76153$; $m = 1,12830$ e adotando os seguintes procedimentos:

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{(0,76153) + (1,12830)(0,76153)} \left[\frac{1 - (0,75)^m}{(0,75)^m} \right] \\ &= 0,49325 \end{aligned} \quad (33)$$

De modo que a média do quartil inferior para o referido exemplo é a seguinte:

$$\begin{aligned} \bar{X}_q &= 10,5652 + 4(16,5 - 10,5652) \left(\frac{1,1283}{1 + (0,76153)(1,1283)} \right) \cdot \\ &\quad \frac{\exp \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{0,76153} \right) \right] \exp [\text{LNGAMA}(1,1283)]}{\exp \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{0,76153} + 1,1283 \right) \right]} \cdot \\ &\quad \{1 - \text{DISTF} [(0,49325); 2(1,1283 + 1); (2/0,76153)]\} \\ &= 11,077 \end{aligned} \quad (34)$$

Finalmente, o valor de CUD para esse caso estudado de pivô-central, calculado de acordo com a Equação 26, é o seguinte:

$$\begin{aligned} \text{CUD} &= 100 \times \left(\frac{11,077}{12,94} \right) \\ &= 86,6\% \end{aligned} \quad (35)$$

Esse valor de CUD, de 86,6%, é bem próximo do CUD calculado diretamente a partir dos valores observados que foi de 87,3% (Tabela 10), considerado relativamente aproximada, denotando que houve um bom ajuste entre os valores de lâmina coletada e seus respectivos valores calculados pelo modelo proposto (Equação 5).

Tabela 10. Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) correspondente aos valores de lâminas coletadas em pivô central.

Ordem original	Posição original	Lâminas ordenadas	$d_i X_i$	Quartil inferior		
				d_i (m)	X_i (mm)	$d_i X_i$
1	82	16,50	1353,0			
2	70	16,00	1120,0			
3	78	16,00	1248,0			
4	58	15,60	904,8			
5	74	15,50	1147,0			
6	122	15,50	1891,0			
7	46	15,00	690,0			
8	50	15,00	750,0			
9	62	15,00	930,0			

Continua...

Tabela 10. Continuação.

Ordem original	Posição original	Lâminas ordenadas	$d_i X_i$	Quartil inferior		
				d_i (m)	X_i (mm)	$d_i X_i$
10	86	15,00	1290,0			
11	126	15,00	1890,0			
12	134	15,00	2010,0			
13	66	14,40	950,4			
14	138	14,00	1932,0			
15	54	13,50	729,0			
16	118	13,50	1593,0			
17	130	13,50	1755,0			
18	146	13,50	1971,0			
19	150	13,50	2025,0			
20	154	13,50	2079,0			
21	142	13,20	1874,4			
22	158	13,00	2054,0			
23	174	12,50	2175,0			
24	186	12,50	2325,0			
25	18	12,00	216,0			
26	38	12,00	456,0			
27	42	12,00	504,0			
28	90	12,00	1080,0			
29	94	12,00	1128,0			
30	162	12,00	1944,0	162,0	12,0	1944,0
31	170	12,00	2040,0	170,0	12,0	2040,0
32	98	11,50	1127,0	98,0	11,5	1127,0
33	106	11,50	1219,0	106,0	11,5	1219,0
34	178	11,50	2047,0	178,0	11,5	2047,0
35	190	11,50	2185,0	190,0	11,5	2185,0
36	30	11,40	342,0	30,0	11,4	342,0
37	34	11,40	387,6	34,0	11,4	387,6
38	102	11,00	1122,0	102,0	11,0	1122,0
39	110	11,00	1210,0	110,0	11,0	1210,0
40	182	11,00	2002,0	182,0	11,0	2002,0

Continua...

Tabela 10. Continuação.

Ordem original i	Posição original d _i (m)	Lâminas ordenadas X _i (mm)	d _i X _i	Quartil inferior		
				d _i (m)	X _i (mm)	d _i X _i
41	22	10,50	231,0	22,0	10,5	231,0
42	26	10,50	273,0	26,0	10,5	273,0
43	114	10,50	1197,0	114,0	10,5	1197,0
44	166	10,50	1743,0	166,0	10,5	1743,0
Soma:	4576	-	59140,2	1690,0	-	19069,6

$$\text{CUD} = 100 \left(\frac{\frac{19069,6}{1690,0}}{\frac{59140,2}{4576}} \right) = 100 \left(\frac{11,2838}{12,924} \right) = 87,31 \%$$

Medidas de eficiência

Enquanto as medidas de uniformidade expressam a capacidade do sistema ou equipamento de irrigação em distribuir a água uniformemente sobre a área irrigada, as medidas de eficiência, ao nível da parcela irrigada expressam a capacidade que tem uma dada irrigação em atender os requerimentos de consumo de água da cultura. Desta forma, pode-se dizer que os parâmetros relativos à eficiência de irrigação aglutinam os efeitos da distribuição de água decorrentes do método em si, com as particularidades do manejo da irrigação. Segundo [Hart et al., \(1979\)](#), desconsiderando as perdas por escoamento, os índices de eficiência, ao nível da parcela irrigada, podem ser resumidos na eficiência de aplicação de água e no percentual da área que recebe água suficiente para suprir, no mínimo, o requerimento hídrico, aqui denominado de índice de adequação da irrigação.

Eficiência de aplicação de água

A eficiência de aplicação de água em uma área irrigada expressa a relação percentual entre o volume de água colocado realmente à disposição da planta, na zona de efetividade de seu sistema radicular, aqui denominado volume útil, e o volume total de água aplicado pela irrigação. Referindo-se à [Figura 13](#), o volume útil corresponde à soma da área adequadamente irrigada, sem o volume

excedente, mais a área indicada como deficiente. Ou seja, toda água incorporada acima da área delimitada pela linha tracejada, representativa da lâmina média aplicada, deve ser considerada água útil.

Essa medida de eficiência pode ser expressa pela seguinte equação:

$$E_A = 100 \left(\frac{\nabla_U}{\nabla_A} \right) \quad (36)$$

onde E_A : eficiência de aplicação em percentual; ∇_U : volume útil incorporado na zona do sistema radicular; ∇_A : volume total aplicado, limitado pelo contorno do perfil de distribuição da água. Esse volume é exatamente igual à lâmina média aplicada definida pela Equação 10 e o volume útil é igual ao volume total aplicada menos o volume excedente ∇_E , ou seja:

$$\nabla_U = \nabla_A - \nabla_E \quad (37)$$

O volume excedente se encontra deduzido no Anexo (Equações 84-87), resultando na seguinte fórmula:

$$\nabla_E = (X_n - \bar{X}) a_L + (X_m - X_n) \cdot \left\{ \text{DISTF} \left[f; 2(m+1); 2/n \right] \left(\frac{m}{1+mn} \right) \cdot \frac{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} \right) \right] \text{EXP} [\text{LNGAMA}(m)]}{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} + m \right) \right]} \right\} \quad (38)$$

onde f é parâmetro da DISTF [] definido na Equação 18.

No caso específico do perfil de água representado pela [Figura 13](#), utilizando os parâmetros de ajuste encontrados na [Tabela 5](#), o cálculo de ∇_E requer, primeiramente, a determinação da média geral aplicada $\bar{X}$, utilizando a Equação 10. Para esse exemplo específico, esse valor já se encontra calculado na Equação 11, resultando em $\bar{X} = 12,94$. Em seguida, é necessário calcular o valor do parâmetro f requerido para avaliar a função DISTF(), usando a Equação 18, o qual depende do valor de a_L que é dado pela Equação 8. Para esse exemplo específico, o valor de a_L já se encontra calculado na Equação 12, resultando em $a_L = 0,4623$ e o valor correspondente de f também já está determinado na Equação 21 ($f = 0,52126$).

Desse modo, o volume excedente de acordo com Equação 34, utilizando os parâmetros ($X_m = 16,50$; $X_n = 10,5652$; $n = 0,76153$; $m = 1,1283$) pode ser determinado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} V_E &= (10,5652 - 12,94)(0,4623) + (16,5 - 10,5652) \cdot \\ &\quad \left\{ \text{DISTF}[(0,52126); 2(1,1283+1); (2/0,76153)] \right\} \cdot \left\{ \left(\frac{1,1283}{1 + (1,1283)(0,76153)} \right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \frac{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{0,76153} \right) \right] \text{EXP} [\text{LNGAMA}(1,1283)]}{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{0,76153} + 1,1283 \right) \right]} \right\} = 0,6915 \end{aligned} \quad (30)$$

Esse volume excedente corresponde a 5,34% da lâmina média de 12,94 mm, a qual é considerada como sendo a lâmina líquida da irrigação.

Dessa forma, o volume útil desse caso exemplificado resulta no seguinte valor:

$$\begin{aligned} V_U &= V_A - V_E \\ &= 12,94 - 0,6915 \\ &= 12,25 \end{aligned} \quad (40)$$

Finalmente, a eficiência de aplicação para a irrigação parametrizada do pivô-central avaliado (Tabela 5) é determinada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} E_A &= 100 \left(\frac{V_U}{V_A} \right) \\ &= 100 \left(\frac{12,25}{12,94} \right) \\ &= 94,66 \end{aligned} \quad (41)$$

Adequação da área irrigada

Esse indicador de desempenho da irrigação expressa a fração da área irrigada com aplicações de água maior ou igual à média geral aplicada. Normalmente, ao se ajustar o perfil de água aplicada a um determinado modelo, usando o procedimento dos mínimos quadrados, a média divide o volume em excesso e o volume em deficiência em duas partes exatamente iguais ([Figuras 13 e 16](#)). No entanto, o valor da fração de área acumulada, onde ocorre a mudança da situação de excesso para deficiência, não é necessariamente igual a 0,5. Essa coincidência ocorreria caso o perfil fosse simétrico, ajustando-se, por exemplo, a distribuição normal.

Normalmente, o valor encontrado como área adequadamente irrigada pode não ser o desejável, mesmo nos casos de valores de uniformidade e eficiência de aplicação, relativamente elevados, como é o caso apresentado na [Figura 13](#) (pivô-central). A avaliação de desempenho dessa irrigação caso resultou nos seguintes indicadores: $a_L = 0,4623$ (Equação 12); $CUC = 89,24\%$ (Equação 13 e [Tabela 6](#)); $CUD = 86,6\%$ (Equação 35); $E_a = 94,66\%$ (Equação 41); $\nabla_A = 12,94$ (Equação 11); $\nabla_e = 0,6915$ (Equação 39) e $\nabla_U = 12,25$ (Equação 40). Analisando cada indicador separadamente, pode-se afirmar que do ponto de vista da uniformidade, essa irrigação pode ser classificada como de bom desempenho, com valor de CUC situado entre 80% e 90% e que a eficiência de aplicação de água de 94,62% certamente está em nível de excelência. Entretanto, o índice de adequação da irrigação de 0,4623, geralmente, não é aceitável, uma vez que, apenas 46,23% da área está adequadamente irrigada.

Fator de adequação da irrigação

Uma vez decidido sobre qual deverá ser a fração de área a ser mantida adequadamente irrigada, então o próximo passo consiste em ajustar o perfil de distribuição da água aplicada, transladando-o para baixo ou para cima, para aumentar ou diminuir a fração de área adequadamente irrigada, de modo que o perfil de distribuição de água resultante intercepte o requerimento médio de água da cultura no ponto desejado, equivalente à fração de área acumulada estabelecida como meta de manejo da irrigação. Nessa decisão, considera-se que o perfil de distribuição de água é característico do sistema de irrigação e invariante no tempo e, portanto, independente da magnitude da lâmina aplicada, conforme relataram [Folegatti et al. \(1998\)](#). A [Figura 17](#) ilustra um caso de aumento da fração de área adequadamente irrigada de 46,23% para 90%.

Esse deslocamento pode ser definido, em termos, de um fator de proporcionalidade, aqui denominado, **Fator de Adequação da Irrigação**, representado por F_i e expresso, matematicamente, da seguinte forma:

$$F_i = \frac{X_R}{X} \quad (42)$$

onde: X_R : lâmina de água ou vazão do perfil ajustado e X : lâmina de água ou vazão do perfil de água, cuja média seja equivalente à lâmina líquida requerida pelo cultivo. É importante ressaltar que, qualquer que seja o valor de X ao ser

multiplicado pelo Fator de Adequação da Irrigação F_i , ele se transforma em X_R . Assim sendo, podem ser estabelecidas as seguintes igualdades:

$$X_{nR} = F_i X_n \quad X_{mR} = F_i X_m \quad \bar{X}_R = F_i \bar{X} \quad (43)$$

onde X_{nR} e X_{mR} : lâmina mínima e máxima ajustada, respectivamente; $\bar{X}_R$: lâmina média do perfil ajustado.

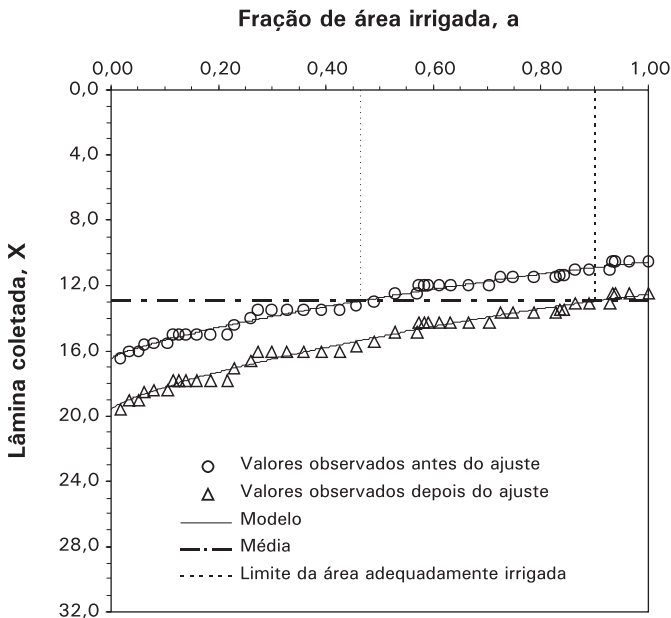


Figura 17. Perfis de água aplicada por um pivô-central, ordenadas de forma decrescente, em função da fração de área irrigada, indicando dois eventos distintos de área adequadamente irrigada (46,23 e 90%).

Considerando a Figura 17, observa-se que a lâmina média original aplicada, $\bar{X}$, encontra-se com o perfil descrito por X_R , exatamente, na fração de área desejada, representada por a_{LR} . Por isso, pode-se estabelecer a seguinte igualdade:

$$\bar{X} = X_{nR} + (X_{mR} - X_{nR}) (1 - a_{LR}^n)^m \quad (44)$$

Desse modo, introduzindo as relações da Equação 42 na Equação 43, tem-se o seguinte resultado:

$$\bar{X} = F_i \left[X_n + (X_m - X_n) (1 - a_{LR}^n)^m \right] \quad (45)$$

Dando origem a seguinte formulação matemática para o cálculo do Fator de Adequação da Irrigação:

$$F_i = \frac{\bar{X}}{\left[X_n + (X_m - X_n) (1 - a_{LR}^n)^m \right]} \quad (46)$$

Com F_i variando no seguinte intervalo:

$$\frac{\bar{X}}{X_m} \leq F_i \leq \frac{\bar{X}}{X_n} \Leftrightarrow 0 \leq a_{LR} \leq 1 \quad (47)$$

Utilizando os parâmetros da modelagem do perfil de água aplicada do pivô-central exemplificado na Tabela 5 e considerando a meta de 90% para área adequadamente irrigada, o Fator de Adequação da Irrigação é igual a:

$$\begin{aligned} F_i &= \frac{12,941155}{\left[10,57 + (16,50 - 10,57) (1 - 0,9^{0,7615})^{1,12830} \right]} \\ &= 1,1879 \end{aligned} \quad (48)$$

Isto significa dizer que para atingir 90% da área com irrigação adequada é necessário majorar a lâmina líquida requerida pelo cultivo em 18,79%, para esse sistema de irrigação.

Desta modo, o valor de F_i é o índice que deverá ser utilizado para corrigir a lâmina líquida requerida L_b a fim de se obter a lâmina bruta L_L que o sistema de

irrigação deverá aplicar. Ou seja, a lâmina bruta de irrigação pode ser definida pela seguinte igualdade:

$$L_B = F_i L_L \quad (49)$$

É claro que quanto mais uniforme for a distribuição da água aplicada, menores serão os valores de F_i necessários para produzir um aumento na área adequadamente irrigada e, conseqüentemente, menores serão os volumes em excesso.

Indicadores de desempenho da irrigação ajustada

Uma vez aplicado o Fator de Adequação da Irrigação encontrado para o ajuste da lâmina líquida requerida, é importante recalcular os indicadores de desempenho resultantes, assumindo que os indicadores de uniformidade não se alteram ao se corrigir o perfil de distribuição de água para aplicação da lâmina bruta requerida. Os parâmetros necessários para a análise de desempenho depois do ajuste do perfil de distribuição de água são os seguintes: volume total de água ajustado ∇_{AR} que é igual à média geral do perfil ajustado; volume excedente resultante ∇_{ER} ; volume útil resultante ∇_{UR} e a eficiência de aplicação de água final E_{AR} .

Volume total de água ajustado

O volume de água total de aplicado, depois do ajuste, pode ser estabelecido pelas seguintes relações:

$$\begin{aligned} \nabla_{AR} &= \overline{X}_R \\ &= F_i \overline{X} \\ &= F_i \nabla_A \end{aligned} \quad (50)$$

Volume excedente de água ajustado

A fórmula de cálculo desse parâmetro de desempenho se encontra deduzida detalhadamente no Anexo (Equações 88-100) e está expressa pela seguinte equação:

$$\nabla_{ER} = F_i \left[X_n a_{LR} + (\overline{X} - X_n) \text{DISTF} (f; 2(m+1); 2(1/n)) \right] - \overline{X} a_{LR} \quad (51)$$

Na qual o parâmetro f pode ser determinado por meio da Equação 17 com

$$a_L = a_{LR}.$$

Volume útil de água ajustado

O **volume útil ajustado** pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}\nabla_{UR} &= \nabla_{AR} - \nabla_{ER} \\ &= F_i \nabla_A - \nabla_{ER}\end{aligned}\quad (52)$$

Eficiência de aplicação de água ajustada

A eficiência de aplicação, depois do ajuste da lâmina, pode ser, calculada da seguinte maneira, seguindo a definição dada pela Equação 36:

$$\begin{aligned}E_{AR} &= 100 \left(\frac{\nabla_{UR}}{\nabla_{AR}} \right) \\ &= 100 \left(\frac{\nabla_{UR}}{F_i \nabla_a} \right)\end{aligned}\quad (53)$$

Exemplo de aplicação

Tomando, para fins de exemplificação, o caso da irrigação por pivô, ilustrado na [Figura 13](#), e assumindo a aplicação de uma meta de área adequadamente irrigada equivalente a $a_{LR} = 0,90$, o perfil de distribuição de água ajustado sofrerá um deslocamento para baixo, proporcional $F_i = 1,1879$ (Equação 48), conforme se encontra ilustrado na Figura 17. Utilizando os parâmetros do modelo dessa irrigação ($X_m = 16,50$; $X_n = 10,5652$; $n = 0,76153$; $m = 1,1283$), apresentados na Tabela 5, e resultado de $\nabla_A = \bar{X} = 12,94$ (Equação 11), os indicadores de desempenho **ajustados** dessa irrigação são os seguintes:

O **volume total ajustado** ∇_{AR} pode ser calculado, utilizando a Equação 49, da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\nabla_{AR} &= F_i \nabla_A \\ &= (1,1879)(12,94) \\ &= 15,37\end{aligned}\quad (54)$$

O **volume excedente ajustado** ∇_{ER} (Equação 51), depois do ajuste da lâmina média aplicada pelo o fator de adequação da irrigação $F_i = 1,1879$, pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
V_{ER} &= F_i \left[X_n a_{LR} + (\bar{X} - X_n) \text{DISTF}(f; 2(m+1); 2(1/n)) \right] - \bar{X} (a_{LR}) \\
&= (1,1879) [(10,5652)(0,9) + (12,9412 - 10,57) \\
&\quad \text{DISTF}(0,05154; 4,2566; 2,6264) - (12,9412)(0,9)] \\
&= 2,4455
\end{aligned} \tag{55}$$

Esse volume excedente corresponde a 18,9% do volume total de água aplicada.

O **volume útil ajustado** V_{UR} , depois do ajuste da lâmina líquida, será o seguinte:

$$\begin{aligned}
V_{UR} &= F_i V_A - V_{ER} \\
&= (1,1879)(12,941155) - (2,4455) \\
&= 12,9267
\end{aligned} \tag{56}$$

A **eficiência de aplicação ajustada** E_{AR} , para o caso estudado, pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
E_{AR} &= 100 \left(\frac{V_{UR}}{F_i V_A} \right) \\
&= 100 \left(\frac{12,927}{(1,1879)(12,94)} \right) \\
&= 84,1\%
\end{aligned} \tag{57}$$

Desta forma, chega-se à conclusão, que majorando a lâmina em 18,79%, a área adequadamente irrigada passa de 46,23% para 90,00%, resultando na redução da eficiência de aplicação de 94,66% para 84,09% e no aumento do excedente de água de 5,34% (Equação 39) para 18,90% (Equação 55), em relação lâmina média de 12,94 mm, considerada como sendo a lâmina líquida da irrigação.

Considerações Finais

Esse trabalho é inovador, ao propor um novo modelo para representar o perfil de distribuição da água aplicada em sistemas de irrigação e, ao mesmo tempo, é analítico, ao integrar, em único fator, denominado fator de adequação de irrigação, os indicadores de desempenho, relativos à uniformidade e eficiência de irrigação. Esse fator pode ser diretamente utilizado para transformar lâmina líquida de irrigação em lâmina bruta. Sua magnitude depende do percentual de área que se deseja manter adequadamente irrigada e da uniformidade de distribuição de água do sistema de irrigação. Seu valor aumenta na medida em que

a uniformidade de aplicação de água do sistema de irrigação diminui e a área adequadamente irrigada aumenta. O fator de adequação proposto pode e deve ser utilizado de forma dinâmica ao longo do ciclo da cultura, promovendo ajustes em seu valor, quando necessário, procurando reduzi-lo nas fases da cultura de menor suscetibilidade ao déficit hídrico ou aumentando-o nas fases mais críticas, objetivando não perder rendimento e reduzir os custos de energia com a irrigação.

Enquanto as medidas de uniformidade expressam a capacidade do sistema ou equipamento de irrigação em distribuir a água uniformemente sobre a área irrigada, as medidas de eficiência, ao nível da parcela irrigada expressam a capacidade que tem uma dada irrigação em atender os requerimentos de consumo de água da cultura. Desta forma, pode-se dizer que os parâmetros relativos à eficiência de irrigação aglutinam os efeitos da distribuição de água decorrentes do método em si, com as particularidades do manejo da irrigação.

Uma vez conhecida a uniformidade do sistema de irrigação, o avaliador deve primeiro utilizar essa informação para estabelecer um julgamento sobre a qualidade da irrigação quanto à sua habilidade na distribuição da água aplicada. Caso o sistema esteja com um desempenho muito baixo, em relação a esse indicador, a decisão poderá ensejar uma revisão hidráulica na rede de distribuição para melhorar o seu padrão de uniformidade. Deve-se ressaltar que a ocorrência de coeficientes de uniformidade baixos implicará, necessariamente, em eficiências de aplicação baixas. Para facilitar o julgamento do sistema em relação a esse indicador, sugere-se adotar uma tabela de classificação, semelhante àquela recomendada por [Bralts \(1986\)](#), utilizando o conceito de uniformidade de emissão, para categorizar a irrigação como: excelente (superior a 90%); bom (80% a 90%); regular (70% a 80%) e ruim (inferior a 70%).

Do ponto de vista do manejo da irrigação o que se almeja com a aplicação da água é prover a quantidade de água necessária para planta que resulte em rendimento tecnicamente otimizado e economicamente viável. Partindo do pressuposto de que o padrão de uniformidade do sistema de irrigação é aceitável e, portanto, não será objeto de mudanças, então a tarefa de ajuste no manejo da água fica restrita à escolha do índice de adequação da área irrigada que se deseja operar o sistema de irrigação. O valor da eficiência de aplicação será consequência dessa decisão. Se o índice de adequação de área irrigada, originalmente encontrado, for majorado, então a eficiência de aplicação de água diminuirá em relação ao valor inicial. Caso contrário, a eficiência de aplicação aumentará. É claro que uma diminuição na área adequadamente irrigada implicará em uma redução potencial de rendimento do cultivo, o que poderá não ser desejável, apesar do aumento alcançado na eficiência de aplicação de água. Em síntese, o ponto ótimo de manejo, em termos da área adequadamente irrigada é, ao final, uma decisão econômica.

Anexo – Derivação de Fórmulas

Lâmina média

Partindo-se da definição de lâmina média (Equação 9), representada por $\bar{X}$, substituindo o valor de X pela definição dada no modelo (Equação 5) e procedendo as devidas integrações, obtém-se o seguinte resultado:

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \int_0^1 \left[X_n + (X_m - X_n)(1 - a^n)^m \right] da \\ &= \int_0^1 X_n da + (X_m - X_n) \int_0^1 (1 - a^n)^m da\end{aligned}\quad (58)$$

Utilizando a técnica de substituição de variáveis para resolver a integral da Equação 58, podem-se estabelecer as seguintes igualdades:

$$\begin{aligned}u = a^n &\Rightarrow a = u^{\frac{1}{n}} \\ &\Rightarrow da = \frac{1}{n} u^{\frac{1}{n}-1} du \\ a = 0 &\Rightarrow u = 0 \\ a = 1 &\Rightarrow u = 1\end{aligned}\quad (59)$$

Procedendo a solução da integral da Equação 58 com as substituições indicadas na Equação 59, obtém-se a seguinte igualdade:

$$\int_0^1 (1 - a^n)^m da = \frac{1}{n} \int_0^1 u^{\frac{1}{n}-1} (1 - u)^m du \quad (60)$$

A solução da integral da Equação 60 pode ser dada em termos da função Beta Completa, trazendo de Abramowicz & Stegun (1972), a seguinte definição:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 u^{\alpha-1} (1 - u)^{\beta-1} du \quad (61)$$

Fazendo $\alpha - 1 = (1/n) - 1$ e $\beta - 1 = m$, a Equação 60 resulta na seguinte solução:

$$\int_0^1 (1 - a^n)^m da = \frac{1}{n} B\left(\frac{1}{n}, m + 1\right) \quad (62)$$

Por outro lado, a função Beta Completa pode ser expressa em termos da função Gama Completa da seguinte maneira (Abramowicz & Stegun, 1972):

$$B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)} \quad (63)$$

De modo que, a Equação 62 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\int_0^1 (1 - a^n)^m da = \frac{1}{n} \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n}\right) \Gamma(m + 1)}{\Gamma\left(\frac{1}{n} + m + 1\right)} \quad (64)$$

Fazendo uso da propriedade $\Gamma(\alpha + 1) = \alpha \Gamma(\alpha)$, relativa à função Gama, a Equação 64 se transforma na seguinte igualdade:

$$\int_0^1 (1 - a^n)^m da = \left(\frac{m}{1 + mn}\right) \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n}\right) \Gamma(m)}{\Gamma\left(\frac{1}{n} + m\right)} \quad (65)$$

O valor da função Gama pode ser facilmente obtido em tabelas e por meio de expressões algébricas (Abramowicz & Stegun, 1972) ou diretamente da planilha Excel (Microsoft Corporation, 1994), utilizando a seguinte relação:

$$\Gamma(\alpha) = \text{EXP}[\text{LNGAMA}(\alpha)] \quad (66)$$

onde EXP[]: função exponencial, na base neperiana, de um argumento qualquer; LNGAMA(): função logaritmo neperiano da função Gama para um número positivo e não nulo. Essas expressões fazem parte do rol de funções contidas na referida planilha Excel.

De modo que a integral da Equação 65 pode ser, também, expressa da seguinte maneira:

$$\int_0^1 (1 - a^n)^m da = \left(\frac{m}{1 + mn}\right) \frac{\text{EXP}\left[\text{LNGAMA}\left(\frac{1}{n}\right)\right] \text{EXP}[\text{LNGAMA}(m)]}{\text{EXP}\left[\text{LNGAMA}\left(\frac{1}{n} + m\right)\right]} \quad (67)$$

Finalmente, pode-se estabelecer a seguinte fórmula para o cálculo da média de X:

$$\bar{X} = X_n + (X_m - X_n) \left(\frac{m}{1+mn} \right) \frac{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} \right) \right] \text{EXP} [\text{LNGAMA} (m)]}{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} + m \right) \right]} \quad (68)$$

Média absoluta dos desvios

Tomando por base a definição da média absoluta dos desvios, representada por $|\bar{D}|$, expressa pela Equação 15 e desdobrando as respectivas integrais, pode-se realizar o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned} |\bar{D}| &= \int_0^{a_L} X \, da - \int_0^{a_L} \bar{X} \, da + \int_{a_L}^1 \bar{X} \, da - \int_{a_L}^1 X \, da \\ &= \int_0^{a_L} X \, da - \int_0^{a_L} \bar{X} \, da + \int_0^1 \bar{X} \, da - \int_0^{a_L} \bar{X} \, da + \int_0^1 X \, da - \int_0^{a_L} X \, da \\ &= 2 \int_0^{a_L} X \, da - 2 \bar{X} a_L \end{aligned} \quad (69)$$

A solução da integral da Equação 69 pode ser obtida, substituindo o valor de X por sua definição proposta na Equação 5 e procedendo da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \int_a^{a_L} X \, da &= \int_0^{a_L} \left[X_n + (X_m - X_n) (1 - a^n)^m \right] da \\ &= \int_0^{a_L} X_n \, da + (X_m - X_n) \int_0^{a_L} (1 - a^n)^m \, da \\ &= X_n a_L + (X_m - X_n) \int_0^{a_L} (1 - a^n)^m \, da \end{aligned} \quad (70)$$

Utilizando a técnica de substituição de variáveis para resolver a integral da Equação 70, podem-se estabelecer as seguintes igualdades:

$$\begin{aligned} u = a^n &\Rightarrow a = u^{\frac{1}{n}} \\ &\Rightarrow da = \frac{1}{n} u^{\frac{1}{n}-1} du \\ a = 0 &\Rightarrow u = 0 \\ a = a_L &\Rightarrow u = a_L^n \end{aligned} \quad (71)$$

Procedendo a solução da integral da Equação 70 com as substituições indicadas na Equação 71, obtém-se a seguinte expressão:

$$\int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da = \frac{1}{n} \int_0^{a_L^n} u^{\frac{1}{n}-1} (1-u)^m du \quad (72)$$

A solução da integral da Equação 72 pode ser dada em termos da função Beta Incompleta, trazendo de Abramowicz & Stegun (1972), a seguinte definição:

$$B_\lambda(\alpha, \beta) = \int_0^\lambda u^{\alpha-1} (1-u)^{\beta-1} du \quad (73)$$

Fazendo $\lambda = a_L^n$, $\alpha - 1 = (1/n) - 1$ e $\beta - 1 = m$, a Equação 72 resulta na seguinte solução:

$$\int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da = \frac{1}{n} B_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}, m+1 \right) \quad (74)$$

Segundo Abramowicz & Stegun (1972), as funções Beta Incompleta e Completa se relacionam da seguinte forma:

$$I_\lambda(\alpha, \beta) = \frac{B_\lambda(\alpha, \beta)}{B(\alpha, \beta)} \quad (75)$$

De modo que, para, $\lambda = a_L^n$, $\alpha = (1/n)$ e $\beta = m+1$, a Equação 75 pode ser rescrita da seguinte maneira:

$$B_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}, m+1 \right) = I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}, m+1 \right) B \left(\frac{1}{n}, m+1 \right) \quad (76)$$

Segundo Abramowicz & Stegun (1972), a função $I_\lambda(\alpha, \beta)$ se relaciona com a distribuição F da seguinte forma:

$$I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}, m+1 \right) = \text{DISTF}(f; 2(m+1); 2/n) \quad (77)$$

onde $\text{DISTF}()$: representa uma das funções estatísticas contidas na planilha Excel, avaliada em f e, nesse caso, aos graus de liberdade $2(m+1)$ e $2/n$, superior e inferior, respectivamente. O valor de f é definido pela seguinte expressão:

$$f = \frac{1}{n + mn} \left(\frac{1 - a_L^n}{a_L^n} \right) \quad (78)$$

Introduzindo a Equação 76 na Equação 74, tem-se o seguinte resultado:

$$\int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da = I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}, m+1 \right) \frac{1}{n} B \left(\frac{1}{n}, m+1 \right) \quad (79)$$

Reconhecendo que os termos $(1/n) B(1/n, m+1)$ e $I_{a_L^n}(1/n, m+1)$ da Equação 79 podem ser substituídos, respectivamente, pelas Equações 67 e 77, então a integral da Equação 79 resulta na seguinte fórmula:

$$\int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da = \text{DISTF} \left[f; 2(m+1); 2/n \right] \left(\frac{m}{1+mn} \right) \cdot \frac{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} \right) \right] \text{EXP} \left[\text{LNGAMA} (m) \right]}{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} + m \right) \right]} \quad (80)$$

De modo que a média dos desvios absolutos, definida pela Equação 37, pode ser dada pela seguinte fórmula:

$$| \bar{D} | = \text{DISTF} \left[f; 2(m+1); 2/n \right] \left(\frac{m}{1+mn} \right) \cdot \frac{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} \right) \right] \text{EXP} \left[\text{LNGAMA} (m) \right]}{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} + m \right) \right]} - \bar{X}_{a_L} \quad (81)$$

Média do quartil inferior

Considerando a definição da média do quartil inferior, representada por $\bar{X}_q$, expressa pela Equação 28 e introduzindo a definição de X (Equação 5) e desdobrando a respectiva integral, tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned}
 \bar{X}_q &= 4 \int_{3/4}^1 \left[X_n + (X_m - X_n)(1 - a^n)^m \right] da \\
 &= 4 \int_{3/4}^1 X_n da + 4(X_m - X_n) \int_{3/4}^1 (1 - a^n)^m da \\
 &= X_n + 4(X_m - X_n) \int_{3/4}^1 (1 - a^n)^m da \\
 &= X_n + 4(X_m - X_n) \left[\int_0^1 (1 - a^n)^m da - \int_0^{3/4} (1 - a^n)^m da \right]
 \end{aligned} \tag{82}$$

As soluções das integrais (primeira e segunda) do resultado da Equação 82 já se encontram deduzidas, respectivamente, nas Equações 67 e 80, reconhecendo na segunda integral que $a_L = 3/4$. Desse modo, a fórmula para o cálculo da média do quartil inferior pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 \bar{X}_q &= X_n + 4(X_m - X_n) \left(\frac{m}{1 + mn} \right) \cdot \\
 &\quad \left\{ \frac{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} \right) \right] \text{EXP} [\text{LNGAMA} (m)]}{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} + m \right) \right]} \right\} \cdot \\
 &\quad \{ 1 - \text{DISTF} [f; 2(m+1); 2/n] \}
 \end{aligned} \tag{83}$$

Volume excedente

A primeira integral da Equação 15 representa exatamente o volume de água excedente, de modo que ∇_E pode ser definido da seguinte forma:

$$\nabla_E = \int_0^{a_L} (X - \bar{X}) da \tag{84}$$

Desdobrando a integral da Equação 84 e considerando a definição de $\bar{X}$, dada pela Equação 9, pode-se estabelecer o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned}
 \forall_E &= \int_0^{a_L} X \, da - \int_0^{a_L} \bar{X} \, da \\
 &= \int_0^{a_L} X \, da - \int_0^{a_L} \bar{X} \, da \\
 &= \int_0^{a_L} X \, da - \bar{X} \, a_L
 \end{aligned} \tag{85}$$

Substituindo a integral da Equação 85 pela solução apresentada na Equação 70 e realizando as devidas simplificações, tem-se o seguinte resultado:

$$\forall_E = (X_n - \bar{X}) a_L + (X_m - X_n) \int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da \tag{86}$$

Introduzindo a solução apresentada pela Equação 80 na Equação 86, obtém-se a seguinte fórmula para o cálculo do volume excedente:

$$\begin{aligned}
 \forall_E = (X_n - \bar{X}) a_L + (X_m - X_n) &\left\{ \text{DISTF} \left[f; 2(m+1); 2/n \right] \left(\frac{m}{1+mn} \right) \cdot \right. \\
 &\frac{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} \right) \right] \text{EXP} [\text{LNGAMA} (m)]}{\text{EXP} \left[\text{LNGAMA} \left(\frac{1}{n} + m \right) \right]} \left. \right\}
 \end{aligned} \tag{87}$$

Volume excedente ajustado

O **volume excedente ajustado**, em relação à média original, pode ser definido da seguinte forma:

$$\forall_{ER} = \int_0^{a_{LR}} (X_R - \bar{X}) \, da \tag{88}$$

De maneira que:

$$\begin{aligned}
 \forall_{ER} &= \int_0^{a_{LR}} (X_R - \bar{X}) da \\
 &= \int_0^{a_{LR}} X_R da - \int_0^{a_{LR}} \bar{X} da \\
 &= F_i \left[\int_0^{a_{LR}} X da \right] - \bar{X} a_{LR} \\
 &= F_i \left[\int_0^{a_{LR}} X_n da + (X_m - X_n) \int_0^{a_{LR}} (1 - a^n)^m da \right] - \bar{X} a_{LR} \\
 &= F_i \left[X_n a_{LR} + (X_m - X_n) \int_0^{a_{LR}} (1 - a^n)^m da \right] - \bar{X} a_{LR}
 \end{aligned} \tag{89}$$

Considerando o desenvolvimento aplicado na Equação 74, pode-se inferir a seguinte solução para a integral da Equação 89, para $a_L = a_{LR}$:

$$\int_0^{a_{LR}} (1 - a^n)^m da = \frac{1}{n} B_{a_{LR}^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \tag{90}$$

De maneira que a Equação 89 pode ser expressa da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \forall_{ER} &= F_i \left[X_n a_{LR} + (X_m - X_n) \left(\frac{1}{n} \right) B_{a_{LR}^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \right] - \bar{X} a_{LR} \\
 &= F_i \left[X_n a_{LR} + (X_m - X_n) \left(\frac{1}{n} \right) B \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) I_{a_{LR}^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \right] - \bar{X} a_{LR}
 \end{aligned} \tag{91}$$

A variável X pode ser transformada em sua contraparte reduzida x da seguinte maneira:

$$x = \frac{X - X_n}{X_m - X_n} \tag{92}$$

onde X: lâmina ou vazão reduzida, variando no intervalo de 0 a 1. De modo, o modelo expresso pela Equação 5, pode ser representado da seguinte forma:

$$x = (1 - a^n)^m \quad (93)$$

A média de x pode ser calculada, integrando a Equação 93, no intervalo de domínio $(0, 1)$, resultando na seguinte equação:

$$\bar{x} = \int_0^1 (1 - a^n)^m da \quad (94)$$

Utilizando a técnica de substituição de variáveis para resolver a integral da Equação 94, podem-se estabelecer as seguintes igualdades:

$$\begin{aligned} u = a^n &\Rightarrow a = u^{\frac{1}{n}} \\ &\Rightarrow da = \frac{1}{n} u^{\frac{1}{n}-1} du \\ a = 0 &\Rightarrow u = 0 \\ a = 1 &\Rightarrow u = 1 \end{aligned} \quad (95)$$

Fazendo uso das igualdades indicadas na Equação 95 para realizar as substituições desejadas, então o valor de $\bar{x}$ se transforma na seguinte integração:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \int_0^1 u^{\frac{(1-n)}{n}} (1-u)^m du \quad (96)$$

Finalmente, considerando a função Beta Completa definida pela Equação 61, para $\alpha - 1 = (1/n) - 1$ e $\beta - 1 = m$, tem-se o seguinte:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} B\left(\frac{1-n}{n} + 1, m + 1\right) \\ &= \frac{1}{n} B\left(\frac{1}{n}, m + 1\right) \end{aligned} \quad (97)$$

Considerando a definição de x expressa pela Equação 92, para o caso particular de $\bar{x}$, pode-se estabelecer que:

$$\frac{\bar{X} - X_n}{X_m - X_n} = \frac{1}{n} B\left(\frac{1}{n}, m+1\right) \quad (98)$$

Substituindo a Equação 98 na Equação 91, pode-se afirmar que:

$$\begin{aligned} V_{ER} &= F_i \left[X_n a_{LR} + (X_m - X_n) \left(\frac{\bar{X} - X_n}{X_m - X_n} \right) I_{a_{LR}^n} \left(\frac{1}{n}, m+1 \right) \right] - \bar{X} a_{LR} \\ &= F_i \left[X_n a_{LR} + (\bar{X} - X_n) I_{a_{LR}^n} \left(\frac{1}{n}, m+1 \right) \right] - \bar{X} a_{LR} \end{aligned} \quad (99)$$

Substituindo a relação à função Beta Incompleta pela função de distribuição F, conforme se encontra indicado pela Equação 76, tem-se o seguinte resultado:

$$V_{ER} = F_i \left[X_n a_{LR} + (\bar{X} - X_n) \text{DISTF} (f; 2(m+1); 2(1/n)) \right] - \bar{X} a_{LR} \quad (100)$$

Na qual o parâmetro f pode ser determinado utilizando a Equação 78 para $a_L = a_{LR}$.

Referências Bibliográficas

- ADDINK, J. W.; KELLER, J.; PAIR, C. H.; SNEED, R. E.; WOLFE, J. Design and operation of sprinkler systems. In: JENSEN, M. E. (Ed.). **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1983, 829 p. (ASAE. Monograph series, 3).
- AZEVEDO, J. A. de; SILVA, E. M. da; RESENDE, M.; GUERRA, A. F. **Aspectos sobre o manejo da irrigação por aspersão para o Cerrado**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1983. 53 p. (Embrapa-CPAC. Circular Técnica, 16).
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. rev. ampl. Viçosa: UFV, 1995. 657 p.
- BRALTS, V. F. Field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. (Ed.). **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 216-240.
- CHAUDRY, F. H. Nonuniform sprinkler irrigation application efficiency. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Reston, v. 204, p. 165-178, 1978.

CHRISTIANSEN, E. J. **Irrigation by sprinkler**. Berkeley: University of California, 1942. 142 p. (Bulletin, 670).

COTRIM, C. E.; BERNARDO, S.; SEIYAMA, G. C.; SOARES, A. A.; DENÍCULI, W. Desempenho de um sistema de irrigação do tipo pivô-central de baixa pressão. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 33, p. 21-27, 1988.

DAVIS, J. R. Measuring water distribution from sprinklers. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 9, n. 1, p. 94-97, 1966.

FOLEGATTI, M. V.; PESSOA, P. C. S.; PAZ, V. P. S. Avaliação do desempenho de um pivô-central de grande porte e baixa pressão. **Scientia agrícola**, Piracicaba, v. 55, n.1, p. 119-127, 1998.

GOLDBERG, D.; GORNAT, B.; RIMON, D. **Drip irrigation**: principles, design, and agricultural practices. Kfar Shumaryahu: Drip Irrigation Scientific, 1976. 296 p.

TEST procedure for determining the uniformity of water distribution of center pivot, corner pivot, and moving lateral irrigation machines equipped with spray or spinkler nozzles. In: HAHN, R. H; ROSENTERETER, E. E. (Ed.). **ASAE Standards 1989**: standards, engineering practices and data developed and adopted by the American Society of Agricultural Engineers. 36. ed. St. Joseph: ASAE, 1989. p. 578-579.

HART, W. E.; HEERMANN, D. F. **Evaluating water distribution of sprinkler irrigation systems**. Fort Collins: University Colorado State, 1976. 42 p. (Technical Bulletin Colorado State University, 128).

HART, W. E.; PERI, G.; SKOGERBOE, G. V. Irrigation performance: an evaluation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Reston, v. 105, n. 3, p. 275-287, 1979.

HART, W. E.; REYNOLDS, W. N. Analytical design of sprinkler systems. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 8, n. 1, p. 83-85, 89, 1965.

HEERMANN, D. F.; HEIN, P. R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1968.

KARMELI, D. Distribution pattern and losses for furrow irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Reston, v. 104, p. 59-69, 1978.

KARMELI, D.; KELLER, J. **Trickle irrigation design**. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 1975. 133 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 678-784, 1974.

KINCAID, D. C.; HEERMANN, D. F. Pressure distribution of a center-pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 13, n. 5, p. 556-558, 1970.

KRUSE, E. G.; HEERMAN, D. F. Implications of irrigation system efficiencies. **Journal of Soil and Water Conservation**, n. 32, v. 6, p. 265-270, 1977.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. 271 p.

MICROSOFT CORPORATION (Redmond, WA). **Microsoft excel, versão 5.0** : guia do usuário. Redmond, 1994.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. 383 p.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A.; CLEMMENS, A. J. Assessing trickle emitter application uniformity. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 12, n. 4, p. 816-821, 1979.

NORUM, S. I.; GIEDON, P.; HART, W. E. Application of system optimal depth concept. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Reston, v. 105, n. 4, p. 375-367, 1979.

OLITTA, A.F.L. **Os métodos de irrigação**. São Paulo: Nobel, 1977. 267 p.

PERI, G. P.; HART, W. E.; NORUM, D. I. Optimal irrigation depths: a method of analysis. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Reston, v. 105, n. 4, p. 341-354, 1979.

ROCHA, F. E. de C.; ANDRADE, L. M. de; AZEVEDO, J. A. de; SILVA, E. M. da; FOLLE, S. M.; FRANZ, C. A. B.; GOMES, A. C. Desenvolvimento de um equipamento de irrigação com deslocamento linear para parcelas experimentais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 4, p. 471-479, 1998.

SILVA, E. M. da. **Furrow irrigation efficiency as affected by furrow spacing**. 1990. 449 f. Thesis (Doctor in Philosophy with a major in Irrigation Engineering) – Faculty of the Department of Agricultural and Biosystems Engineering, University of Arizona, Tucson, 1990.

SILVA, E. M. da; AZEVEDO, J. A. de. **Dimensionamento da lateral de irrigação do pivô-central**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1998. 54 p. (Embrapa-CPAC. Documentos, 71).

SILVA, E. M. da; AZEVEDO, J. A. de; GUERRA, A. F.; FIUERÊDO, S. F.; ANDRADE, L. M. de; ANTONINI, J. C. dos A. **Manejo de irrigação por tensiometria de culturas de grãos na região do Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 60 p. (Embrapa Cerrados. Circular técnica, 6).

SILVA, E. M. da; HART, W. E. Modelo estatístico de distribuição de água infiltrada aplicado à irrigação deficiente. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 9., 1992, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABID, 1992. v.1, p.469-492.

SILVA, E. M. da; PINTO, A. C. de Q.; AZEVEDO, J. A. de. **Manejo de irrigação e fertirrigação na cultura da mangueira**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1996. 77 p. (Embrapa-CPAC. Documentos, 61).

SOLOMON, K.; KELLER, J. Trickle irrigation uniformity and efficiency. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Reston, v. 104, n. 3, p. 293-306, 1978.

T-L IRRIGATION COMPANY. **All T-L systems are powered by hydraulics for continuous movement..** Disponível em: <<http://www.tlirr.com>>. Acesso em: 22 set. 2002.

WALKER, W. R. Explicit sprinkler irrigation uniformity: efficiency model. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Reston, v. 105, n. 2, p. 129-136, 1979.

WARRICK, A. E.; HART, W. E.; YITAYEW, M. Calibration of distribution and efficiency for nonuniform irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 111, n. 4, p. 674-686, 1989.

WARRICK, A. W. Interrelationships of irrigation uniformity terms. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 109, n. 3, p. 317-332, 1983.

WILCOX, J. C.; SWAILES, G. E. Uniformity of water distributions by some under-tree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, Ottawa, v. 27, n. 11, p. 565-583, 1947.

WU, I. P.; GITLIN, H. M. Drip irrigation application efficiency and schedules. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 26, n. 1, p. 92-99, 1983.

Analysis of Acting of the Irrigation

Abstract – *The irrigation performance of any irrigation system is highly facilitated when using a fitted model to represent the measured data. Several statistical distribution models, such as uniform, normal, lognormal, specialized power, beta, and gamma, have been used to fit applied water from irrigation, as an aid to evaluate the irrigation performance. However, the goodness of fitting the model to the observed values is very important to warrant reliable results. The purposed model resembles a power function and has the desirable flexibilities for adjusting data. It uses four adjusting parameters, conferring to the model a great deal of power to adjust a variety of possible shapes of normally found distribution profiles from water irrigation applications. Its adjusting parameters can be easily estimated using the “Solver” routine from Microsoft Excel. The new mathematical model is used to represent the applied water to derive the formulations needed to calculate all the necessary parameters for compute uniformities and efficiency measures. Additionally, it is purposed an irrigation factor to adjust a given crop water depth so that the resulting average applied water will match a established goal, defined in terms of the desired amount of fully irrigated area.*

Index terms: Irrigation performance, mathematical model, irrigation efficiency.