



C A P Í T U L O 4

AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA EM PIVÔ CENTRAL

Ana Cláudia Sátiro de Araújo

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Vinícius Villa e Vila

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Jessica Sabrina de Castro Couto

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Patrícia Angélica Alves Marques

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Fernando Campos Mendonça

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Marcos Vinicius Folegatti

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Sergio Nascimento Duarte

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

RESUMO: A irrigação por pivô central destaca-se pela capacidade de aplicar água de forma automatizada e eficiente em grandes áreas agrícolas, porém sua eficiência depende diretamente da uniformidade de aplicação da água ao longo do raio irrigado. A determinação dessa uniformidade é essencial para evitar regiões com déficit ou excesso de lâmina, reduzir desperdícios, otimizar o uso de energia e garantir o desempenho agrônomo das culturas. A avaliação envolve procedimentos estruturados que incluem seleção e posicionamento adequado de coletores, controle das condições ambientais, verificação da operação do pivô e mensuração precisa dos volumes aplicados. A conversão desses volumes em lâminas e o emprego de métodos de análise específicos para sistemas circulares, como o coeficiente de uniformidade de Heermann & Hein (CUC_{HH}), permitem quantificar a homogeneidade da aplicação e identificar falhas de desempenho relacionadas a pressão, desgaste de emissores e condições operacionais. A metodologia possibilita diagnósticos confiáveis e fundamenta decisões de manejo e manutenção que asseguram o bom funcionamento do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: coeficiente de Heermann & Hein; eficiência do uso da água; manejo da irrigação.

ABSTRACT: The center pivot irrigation system stands out for its ability to apply water automatically and efficiently over large agricultural areas; however, its efficiency depends directly on the uniformity of water application along the irrigated radius. Determining this uniformity is essential to prevent areas with deficit or excess irrigation, reduce waste, optimize energy use, and ensure the agronomic performance of crops. The evaluation involves structured procedures that include the proper selection and positioning of collectors, control of environmental conditions, verification of pivot operation, and precise measurement of the applied volumes. The conversion of these volumes into applied depths, along with the use of specific analytical methods for circular systems—such as the Heermann & Hein uniformity coefficient (CUC_{HH}) allows quantification of application homogeneity and identification of performance issues related to pressure, emitter wear, and operational conditions. This methodology enables reliable diagnostics and supports management and maintenance decisions that ensure the proper functioning of the system.

KEYWORDS: Heermann & Hein coefficient; water use efficiency; irrigation management.

INTRODUÇÃO

A irrigação mecanizada por pivô central consolidou-se, nas últimas décadas, como uma das tecnologias mais empregadas para o suprimento hídrico em sistemas agrícolas de médio e grande porte. Sua ampla adoção no Brasil está associada à elevada capacidade de automação, à possibilidade de aplicação controlada de

lâminas de água e ao potencial de manejo preciso, capaz de atender às exigências hídricas de diferentes culturas ao longo de todo o ciclo produtivo. No entanto, a eficiência real de um pivô central depende de forma decisiva de sua uniformidade de distribuição de água, parâmetro que expressa o quão homogênea é a lâmina aplicada ao longo de toda a área irrigada.

A uniformidade de aplicação determina o desempenho técnico, econômico e ambiental de sistemas de irrigação pressurizados. Uma distribuição inadequada provoca regiões com déficit e outras com excesso de água, acarretando impactos significativos na produtividade das culturas, no uso de energia, na lixiviação de nutrientes, na eficiência do uso da água e no aumento de custos operacionais. Em condições de baixa uniformidade, o produtor tende a elevar a lâmina média de irrigação para compensar as zonas que recebem menor volume, induzindo desperdício hídrico e aumento de custos sem ganhos de produtividade proporcionais. Assim, avaliações periódicas da uniformidade tornam-se ferramentas essenciais para o manejo racional da irrigação e para a tomada de decisão em relação à manutenção, substituição de emissores, ajustes na pressão e calibração de velocidade do equipamento.

No caso particular dos pivôs centrais, a avaliação da uniformidade envolve desafios específicos decorrentes do caráter radial da distribuição de água. Diferentemente de sistemas lineares ou por aspersão convencional, onde os coletores representam áreas semelhantes, no pivô central cada ponto amostrado corresponde a diferentes faixas de área irrigada conforme a distância radial do ponto em relação ao centro do equipamento. Dessa forma, métodos convencionais de cálculo, como o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), não representam adequadamente a variabilidade espacial da aplicação em pivôs, exigindo o uso de metodologias adaptadas, como o índice de Heermann & Hein (CUC_{HH}), amplamente recomendado para sistemas circulares.

A determinação precisa desses coeficientes requer a execução de um protocolo sistematizado que contemple fatores como número e disposição dos coletores, condições meteorológicas durante a avaliação, controle e correção para evaporação, verificação das pressões de operação, velocidade do pivô, tipo e espaçamento dos emissores e características topográficas da área. A correta interpretação dos resultados obtidos permite identificar falhas operacionais, desgastes de bocais, problemas hidráulicos, distorções causadas por vento, desuniformidades estruturais e limitações do projeto original do equipamento. A adoção de práticas de monitoramento contínuo e manutenção preventiva contribui para aumentar a longevidade dos equipamentos.

MATERIAIS E EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

A execução de uma avaliação de uniformidade em pivô central exige um conjunto específico de materiais e equipamentos que garantem precisão nas medições, repetibilidade dos resultados e confiabilidade nos cálculos posteriores. O item central são os coletores, recipientes responsáveis por armazenar a água aplicada durante o ensaio. Eles devem ser totalmente padronizados, sem deformações, com bordas rígidas e simétricas, altura mínima de cerca de 150 mm e diâmetro que não seja inferior a metade da altura ou a 85 mm. Essa configuração é necessária para evitar respingos, extravasamentos e interferências na coleta, assegurando que todo volume retido seja apenas o decorrente da precipitação proveniente dos emissores do pivô.

Para a sustentação dos coletores utilizam-se hastes ou suportes, que podem ser metálicos, de PVC ou outro material resistente. O suporte deve permitir nível adequado, garantindo que a boca do coletor permaneça sempre horizontal; inclinações mínimas podem provocar erros significativos na lâmina coletada. Além disso, recomenda-se a utilização de provetas volumétricas com diferentes capacidades, permitindo a leitura precisa dos volumes coletados após o ensaio. A acurácia das provetas deve ser compatível com o intervalo de volumes esperado conforme a lâmina aplicada e a área do coletor.

O levantamento espacial dos coletores exige equipamentos como trena, marcadores, GPS e preferencialmente um nível de mão ou nível a laser, assegurando o correto posicionamento radial e alinhamento das fileiras. Para monitoramento ambiental, instrumentos como anemômetros, termômetros e, quando possível, sensores portáteis de umidade relativa auxiliam na caracterização das condições meteorológicas durante o teste, elemento fundamental para interpretação dos resultados, uma vez que ventos acima de limites aceitáveis podem comprometer a distribuição da água.

Também são indispensáveis planilhas de campo, pranchetas, etiquetas de identificação, sacolas para armazenamento de coletores após uso e recipientes com volumes previamente medidos, utilizados para o controle de evaporação. Por fim, computadores com software de planilha eletrônica são essenciais para o processamento dos dados, especialmente para o cálculo de índices ponderados como o CUC_{HH} .

PREPARAÇÃO DA ÁREA E CONDIÇÕES DE ENSAIO

Antes do início das medições, a área destinada ao ensaio deve ser cuidadosamente preparada, de modo a minimizar interferências externas e assegurar que o teste represente com fidelidade o desempenho real do pivô central. Inicialmente,

recomenda-se selecionar dias com condições climáticas favoráveis, priorizando períodos com velocidade do vento inferior a 2 m/s, o que geralmente corresponde às primeiras horas da manhã, ao entardecer ou durante a noite. Caso não seja possível evitar a realização em períodos mais quentes, é imprescindível registrar as condições de vento, temperatura e umidade relativa, informações que serão utilizadas posteriormente para interpretação ou correções de evaporação.

Um passo fundamental é a avaliação prévia do estado de funcionamento do pivô. Isso inclui verificar pressões de operação das linhas laterais, conferir se todos os bocais e reguladores de pressão estão íntegros e sem obstruções, analisar possíveis vazamentos, rupturas em mangueiras e garantir que todos os emissores estejam operando nas características especificadas pelo fabricante. Ajustar a pressão dentro de uma faixa de tolerância de $\pm 5\%$ da pressão de projeto é indispensável para que as vazões estejam dentro dos valores esperados e, conseqüentemente, para que a lâmina de água aplicada seja representativa do desempenho do sistema. A topografia da área também deve ser observada e registrada. Desníveis podem alterar a pressão disponível nos emissores e influenciar significativamente a distribuição de água. Recomenda-se elaborar um perfil topográfico simplificado, identificando variações de declividade ao longo do percurso do pivô, especialmente se houver trechos ascendentes ou descendentes relevantes. Em áreas planas, esta etapa é mais simples, mas ainda assim deve ser documentada.

Após essas verificações, deve-se proceder a marcação da trajetória do pivô e ao delineamento das linhas onde os coletores serão posicionados. É importante estimar a lâmina esperada e programar a velocidade do pivô para que o ensaio forneça volumes suficientes para uma leitura precisa, geralmente resultando em lâmina mínima de 15 mm. Todas essas informações são registradas no formulário de campo, que também inclui horário de início e término, direção e intensidade do vento, condições da cultura (quando realizada sobre lavoura), além de observações sobre o entorno que possam interferir no ensaio, como obstáculos, áreas sombreadas, presença de animais ou trânsito de máquinas.

POSICIONAMENTO E ARRANJO DOS COLETORES

O posicionamento dos coletores é uma das etapas mais críticas do processo, uma vez que a representatividade espacial da amostragem impacta diretamente a precisão dos cálculos de uniformidade. Para sistemas de pivô central, recomenda-se dispor os coletores em duas ou mais linhas retas, perpendiculares ao sentido de deslocamento do pivô (Figura 1), estendendo-se desde a região próxima ao centro até o limite externo da área irrigada. Cada coletor deve representar adequadamente um anel concêntrico da área circular que o pivô cobre, e, por isso, o espaçamento

entre eles não deve ultrapassar determinados limites: até 3 metros quando o raio de alcance dos aspersores é inferior a 10 metros, e até 5 metros quando o raio é maior. Esse cuidado garante que a amostragem seja suficientemente densa para captar variações rápidas na lâmina distribuída.

Para evitar padrões artificiais ou interferências geométricas nos dados, é recomendável introduzir uma descentralização entre linhas, fazendo com que cada linha seja levemente deslocada em relação à anterior. Essa técnica reduz o risco de que todos os coletores coincidam exatamente com a projeção de emissores específicos, o que poderia gerar tendências sistemáticas nas medições. Além disso, as linhas não devem ultrapassar 50 metros de extensão total para manter proporcionalidade com o raio do pivô e permitir que o ensaio seja processado com coerência espacial.

Na instalação, cada coletor deve ser firmemente fixado ao suporte e nivelado, garantindo que a boca esteja perfeitamente horizontal. Em condições de vento moderado, recomenda-se posicionar o lábio dos coletores a no máximo 0,3 metro acima do solo ou do topo da vegetação, reduzindo a interferência aerodinâmica e o desvio lateral das gotas. Em casos de culturas de porte elevado, pode ser necessário elevar o coletor, desde que mantida a estabilidade e o nivelamento.

Após o posicionamento, cada coletor é devidamente numerado, mapeado e incluído no croqui da área, indicando claramente sua distância radial em relação ao centro do pivô. Essa informação é essencial para o cálculo da lâmina ponderada e das áreas anelares representadas por cada ponto. Durante todo o arranjo, devem-se evitar áreas próximas a torres, rodas e estruturas do pivô que possam causar sombreamento, turbulência ou respingos indesejados. Finalizada a montagem, fotografa-se o arranjo e registram-se quaisquer observações que possam influenciar a interpretação dos resultados.



Figura 1, Posicionamento dos coletores para a realização do teste. Fonte: Hohenberger, 2016.

CONTROLE DE EVAPORAÇÃO

O controle de evaporação constitui uma etapa essencial para garantir a precisão das medições durante a avaliação de uniformidade, especialmente quando o ensaio é realizado sob condições ambientais menos favoráveis, como temperaturas elevadas, baixa umidade relativa ou ventos moderados. A evaporação da água acumulada nos coletores pode gerar erros significativos, reduzindo artificialmente o volume coletado e, conseqüentemente, alterando de forma não representativa os valores de lâmina aplicados ao longo da área irrigada. Para compensar esses efeitos, utiliza-se o método dos coletores de controle, que consiste em posicionar pelo menos três coletores adicionais, localizados em área protegida ou parcialmente sombreada, onde não receberão precipitação do pivô.

Esses coletores de controle são preenchidos previamente com um volume conhecido de água, medido com precisão por proveta volumétrica. Durante todo o período do ensaio, eles permanecem expostos às mesmas condições ambientais observadas pelos demais coletores, sendo o volume final medido imediatamente após o término da aplicação. A diferença entre o volume inicial e o volume final fornecido pelos coletores de controle representa a taxa de evaporação ao longo do experimento. Este valor deve então ser descontado proporcionalmente do volume coletado nos demais recipientes.

PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Inicia-se com a verificação de todos os elementos envolvidos, garantindo que os coletores estejam devidamente posicionados, nivelados e identificados, e que a planilha de campo esteja pronta para receber as medições. Uma vez confirmada a correta instalação dos coletores, procede-se à preparação operacional do pivô, ajustando-se sua velocidade e assegurando que todos os emissores estejam funcionando conforme o padrão estabelecido pelo fabricante. É importante que a operação do pivô durante o teste represente fielmente as condições usuais de irrigação, utilizando os mesmos ajustes de pressão, velocidade, acionamento do canhão final e setores de irrigação. Alterações artificiais nesses parâmetros comprometeriam a representatividade dos resultados.

Com tudo verificado, o pivô é acionado e inicia-se oficialmente o ensaio, anotando-se o horário inicial, direção predominante do vento e quaisquer observações relevantes. À medida que o equipamento percorre a área e inicia o processo de aplicação de água sobre os coletores, deve-se evitar interferências externas, como

tráfego de pessoas, entrada de animais ou deslocamento de máquinas, que possam atingir, derrubar ou salpicar água nos recipientes.

Assim que a irrigação sobre a área de coletores é concluída, normalmente após a passagem completa do lance do pivô correspondente à extensão das linhas de coleta, inicia-se a etapa de medição dos volumes. Essa medição deve ser feita de forma rápida, porém cuidadosa, utilizando provetas volumétricas adequadas ao volume esperado. Cada volume medido é imediatamente registrado na planilha, junto das informações do coletor correspondente. Caso algum coletor tenha sido derrubado, danificado ou esteja com algum indício de erro evidente, tal observação deve ser anotada, e a medição poderá ser descartada na fase de tratamento dos dados.

CÁLCULOS DA UNIFORMIDADE

Uma vez registrados os volumes coletados, o passo seguinte consiste em convertê-los para valores de lâmina de irrigação expressos em mm (Equação 1). Essa conversão é fundamentada na relação direta entre o volume de água armazenado pelos coletores e a área da sua borda. Para realizar essa conversão, é necessário conhecer a área útil do coletor, normalmente calculada com base no diâmetro interno da borda superior.

$$L \text{ (mm)} = \frac{V}{A_c} \times 1000 \quad \text{Equação 1}$$

em que: L é a lâmina aplicada (mm), V é o volume coletado (m^3), A_c é a área da borda do coletor (m^2), e 1000 é o fator que converte metros cúbicos para milímetros sobre a área.

A etapa de cálculo da uniformidade constitui o núcleo analítico da avaliação, pois é nela que os dados coletados em campo são transformados em indicadores quantitativos capazes de expressar o desempenho real do pivô central. Diferentemente de sistemas de irrigação lineares ou por aspersão convencional, nos quais os coletores representam áreas iguais, o pivô central apresenta uma particularidade geométrica singular: a área irrigada aumenta proporcionalmente com a distância ao centro. Isso torna inadequado o uso de coeficientes tradicionais baseados em médias simples, como o CUC de Christiansen (1942), e exige o emprego de índices que considerem o caráter radial da aplicação, sendo o mais recomendado o coeficiente de uniformidade de Heermann & Hein (CUC_{HH}) (1968).

O CUC_{HH} utiliza um método ponderado que atribui maior peso às lâminas coletadas nos pontos mais distantes do pivô, uma vez que esses representam faixas de área maiores dentro do círculo irrigado. Assim, cada lâmina (L_i) é relacionada diretamente ao respectivo raio (R_i), garantindo que a contribuição de cada coletor para o cálculo final seja proporcional à área irrigada que ele representa. Antes,

porém, torna-se necessário calcular a lâmina ponderada (L_p) que corresponde a uma referência média ajustada à distribuição espacial dos pontos (Equação 2). Essa ponderação leva em conta o fato de que cada coletor representa um anel circular de largura proporcional ao espaçamento entre coletores, e sua distância ao pivô define o peso relativo no cálculo da média.

Após determinada a lâmina ponderada, aplicam-se os valores na fórmula do CUC_{HH} (Equação 3), que compara a diferença entre cada ponto coletado e a lâmina ponderada pelo respectivo raio:

$$L_p = \frac{\sum (R_i \cdot L_i)}{\sum R_i} \quad \text{Equação 2}$$

$$CUC_{HH} = 100 \left(1 - \frac{\sum R_i |L_i - L_p|}{\sum R_i L_p} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Esse cálculo resulta em um índice percentual que expressa o grau de homogeneidade da aplicação. Quanto menor a soma das diferenças ponderadas entre as lâminas individuais e a lâmina média ponderada, maior será o valor do CUC_{HH} , aproximando-se do ideal de 100%. Valores elevados indicam distribuição uniforme e operação adequada dos emissores, pressões dentro dos limites recomendados e baixa influência de vento ou topografia. Por outro lado, valores baixos refletem problemas mecânicos, variações de pressão ao longo do equipamento, mal dimensionamento ou condições ambientais adversas durante o ensaio.

AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

O coeficiente de uniformidade calculado deve ser utilizado como um indicador do desempenho do conjunto aspersor em relação às condições do campo, ambientes e de pressão, e às variações de pressão que prevalecem durante o ensaio. O coeficiente de uniformidade de um novo conjunto aspersor pode ser utilizado para a comparação de diferentes tipos de conjuntos aspersores e como uma referência para máquinas de irrigação similares que foram utilizadas durante um período de tempo;

Se o coeficiente de uniformidade de um equipamento de irrigação instalado desviar substancialmente do valor especificado no projeto inicial, realizar outras investigações para determinar a causa. Um coeficiente de uniformidade menor do que o valor de projeto pode indicar dispositivos de aplicação de água desgastados, quebrados ou com defeito. A interpretação do CUC_{HH} geralmente segue faixas classificatórias como: excelente ($> 90\%$), bom (80–90%), regular (70–80%), ruim (60–70%) e inaceitável ($< 60\%$). No entanto, essas faixas podem variar conforme normas técnicas, recomendações de fabricantes ou exigências de certificações.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da uniformidade em pivôs centrais demonstra-se indispensável para garantir a eficiência operacional do sistema de irrigação. O uso de procedimentos padronizados, aliado ao cálculo do CUC_{HH} , permite identificar variações na distribuição de água que podem comprometer o desempenho do equipamento. Resultados inferiores aos valores esperados indicam a necessidade de inspeções adicionais para verificar desgaste, defeitos ou inadequações no manejo, enquanto valores satisfatórios confirmam o correto funcionamento do sistema e a adequação das condições de operação. A uniformidade elevada contribui para melhor aproveitamento da água, redução de perdas, maior eficiência energética e estabilidade produtiva das culturas.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT. NBR 14244: Equipamentos de irrigação mecanizada: pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos: determinação da uniformidade de distribuição de água. 1998.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR ISO 11545: equipamentos de irrigação agrícola: máquinas de irrigação pivô central e linear móvel, equipadas com sprayers ou aspersores: determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, 2016.

Borges Júnior, J. C. F., Andrade, C. L. T. AvaPivo - Programa computacional para avaliação da irrigação por pivô central. Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 281, 27 p, 2024.

Colombo, A.; Faria, L. C.; Silva Júnior, J. J. D.; Sant'ana, J. A. D. V.; Beskow, S.; Nörenberg, B. G. Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste de sprays de placa oscilante. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, p. 719- 726, 2015.

Hart, W. E. Overhead irrigation pattern parameters. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, 42, 354-355, 1961.

Hohenberger, L. Avaliação de uniformidade de distribuição de água em um pivô central no município de Alegrete-RS. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), 2016.