

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS PIVÔ CENTRAL NA REGIÃO OESTE DA BAHIA

**Aureo Silva de Oliveira¹; Francisco Adriano de Carvalho Pereira¹; Vital Pedro da Silva Paz¹;
Carlos Amilton Santos²**

¹*Departamento de Engenharia Agrícola, Escola de Agronomia, Universidade Federal da Bahia
Cruz das Almas, BA, aureo@ufba.br*

²*Netafim Brasil, Barreiras, BA*

1 RESUMO

A irrigação por pivô central vem expandindo-se no oeste da Bahia, com centenas de unidades em operação, irrigando culturas como milho, café, feijão, grama, entre outras. O pivô central por suas características de irrigar extensas áreas, é um equipamento demandante de recursos energéticos e hídricos em larga escala. Com o objetivo de avaliar o desempenho de sistemas pivô central na região oeste da Bahia, a partir de indicadores de uniformidade de distribuição de água, adequabilidade da irrigação e eficiência de aplicação de água, ensaios de campo foram conduzidos em equipamentos de onze propriedades agrícolas dos municípios de Barreiras (12°09'S; 45°00'W) e Bom Jesus da Lapa (13°16'S; 43°25'W). A uniformidade de aplicação de água, segundo o coeficiente de uniformidade radial (CU_r), variou de 67,6 a 92,4%, com média de 83%, apresentando a maioria dos pivôs, coeficiente entre 80 e 90%. A eficiência em potencial de aplicação de água (EA_p) apresentou média de 89,5%, variando de 80 a 99%. Apesar destes valores encontrarem-se em faixas aceitáveis, significativas lâminas extras de irrigação podem ser requeridas, especialmente para irrigação de culturas mais rentáveis e para compensar perdas de água pela ação do vento e evaporação tão frequentes em condições de cerrado.

UNITERMOS: Irrigação pressurizada, pivô central, uniformidade da irrigação, eficiência da irrigação

**OLIVEIRA, A. S. de; PEREIRA, F. A. de C.; PAZ, V. P. da S.
EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF CENTER PIVOT SYSTEMS IN WESTERN
BAHIA**

2 ABSTRACT

Irrigation through center pivot has expanded over Western Bahia, with hundreds of operating units irrigating crops like corn, coffee, beans and grass, among others. Because of its far-reaching irrigation characteristics the center pivot is a piece of equipment that requires a large supply of water and energy resources. Aiming to evaluate the performance of center pivot systems in western Bahia from irrigation uniformity indicators, irrigation adequacy and efficiency, field tests were conducted in systems of eleven farms in Barreiras (12°09'S; 45°00'W) and Bom Jesus Da Lapa (13°16'S; 43°25'W) areas. According to the radial uniformity coefficient (CU_r), irrigation uniformity varied from 67.6 to

92.4%, averaging 83%, and the greatest number of pivots showed coefficient between 80 and 90%. The low quarter potential efficiency (EAp) averaged 89.5%, varying from 80 to 99%. Although these values have acceptable levels, significant extra water depths may be required, especially for the irrigation of more profitable crops and to make up for water losses caused by wind effects and evaporation, which are frequent in Brazilian high plains.

KEYWORDS: Pressurized irrigation, center pivot, irrigation uniformity, irrigation efficiency

3 INTRODUÇÃO

Desde o seu patenteamento em 1952 (PAIR et al., 1983) o pivô central popularizou-se em todo o mundo, sendo atualmente, o sistema autopropelido de irrigação por aspersão de maior aceitação. Aplica-se a um amplo elenco de culturas, incluindo graníferas, hortaliças, café, forrageiras e gramíneas, estas, inclusive, em associação ao pastejo natural de animais criados extensivamente (JACINTO, 2001). Na Bahia, a maior concentração de unidades de pivô central ocorre no oeste do estado e a região já conta com centenas de equipamentos em operação.

O pivô central consiste de uma longa tubulação apoiada sobre torres acima do solo, diferenciando-se dos demais sistemas de irrigação por aspersão, principalmente porque a cultura é irrigada enquanto uma tubulação com emissores conectados gira em torno de um ponto fixo ou pivô. Disso resulta que a velocidade média de deslocamento dos emissores aumenta do centro para a periferia da área e, conseqüentemente, diminui o tempo disponível para aplicação de água por unidade de comprimento da lateral, fazendo com que a precipitação dos emissores também aumente (HEERMANN & KOHL, 1983).

Em função de suas características particulares, o dimensionamento, a instalação e a operação do pivô central requerem atenção especial a fim de se garantir uniformidade na aplicação de água e, por conseguinte, de

fertilizantes e outros produtos químicos dissolvidos. Alta uniformidade de distribuição é possível de se obter com pivô central (MERRIAN et al., 1983; KELLER & BLIESNER, 1990), devido ao movimento contínuo, tamanho e disposição dos emissores relativamente próximos uns dos outros. No entanto, são muitos os fatores que podem afetar a performance do pivô quando em operação e avaliações periódicas do seu desempenho e funcionamento, incluindo testes com o conjunto motobomba, a rede de tubulação e a uniformidade dos emissores são importantes para assegurar que o pivô opere adequadamente (HEINEMENN, 1996) e que a cultura se desenvolva de maneira satisfatória.

A expansão da agricultura irrigada no oeste da Bahia, estimulada pela abundância de água, principalmente de mananciais superficiais, linhas de financiamento e rentabilidade de culturas adaptadas, deverá exigir no futuro uma demanda igualmente crescente de energia elétrica e por conseguinte maiores investimentos no setor. Diante dessa perspectiva, esforços devem ser empreendidos no sentido de se usar com mais racionalidade os recursos hídricos e energéticos disponíveis.

O presente trabalho objetivou avaliar o desempenho de sistemas pivô central na região oeste da Bahia, a partir de indicadores de uniformidade de distribuição de água, adequabilidade da irrigação e eficiência de aplicação de água, com o propósito de subsidiar a elaboração de perfis de demanda energética desses sistemas e propor melhoria no manejo dos equipamentos e da água de irrigação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização das unidades de pivô central

Neste estudo, avaliou-se onze sistemas pivô central instalados em fazendas dos municípios de Barreiras (12°09'S; 45°00'W) e Bom Jesus da Lapa (13°16'S; 43°25'W), na Bahia. As adutoras que abastecem os pivôs derivam água de mananciais como o rio de Janeiro, das Balsas e das Pedras, em Barreiras, e do rio Corrente, em Bom Jesus da Lapa. Nenhum dos pivôs possuía canhão hidráulico na extremidade da lateral, comumente utilizado para ampliar a área irrigada. Em todas as propriedades o conjunto motobomba era acionado por motor elétrico de potência variando entre 150 a 350 cv, em alguns casos instalados em série ou em paralelo. Em todos os pivôs, os emissores eram do tipo "spray", com reguladores de pressão e as torres eram acionadas por motores elétricos.

A Tabela 1 lista as propriedades agrícolas visitadas com as respectivas culturas e áreas irrigadas, detalhes dos equipamentos avaliados e a capacidade de armazenamento de

água do solo (DTA), representativa da camada até a profundidade de 60 cm. Os valores de DTA foram obtidos por gravimetria, a partir de amostras de solo secas em estufa a 105°C e densidade aparente do solo.

4.2 Uniformidade de distribuição de água

Após um evento de irrigação diferentes pontos da área recebem água em quantidade maior, menor ou igual àquela requerida pela cultura. A variabilidade na quantidade de água aplicada é usualmente obtida por uma medida de dispersão, expressando-a de forma adimensional, pela comparação com o valor médio (FRIZZONE, 1992). O mais conhecido indicador que expressa essa variabilidade é o CUC, coeficiente de uniformidade de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942). Heermann & Hein (1968) adaptaram o CUC ao sistema pivô central (equação 1), onde os coletores de água são dispostos radialmente e cada coletor representa uma faixa irrigada circular que é função de sua distância radial. Nestas condições, o CUC foi denominado de coeficiente de uniformidade radial, CUR (KELLER & BLIESNER, 1990).

Tabela 1. Identificação dos equipamentos em cada propriedade, cultura, área irrigada e disponibilidade de água no solo.

Fazenda	Cultura	Potência Motor (cv)	Área irrigada (ha)	Relação cv ha ⁻¹	Diâm. adutora (mm)	Nº de torres	PNrg. (kPa)	DTA (mm m ⁻¹)
1. AGRONOL	Café	250	108,00	2,31	250	12	138	162
2. BEM BOM	Milho	150	90,26	1,66	300	10	103	160
3. CAMPO ABERTO	Café	175	121,10	1,44	300	12	69	72
4. ESPERANÇA	Feijão	200	108,00	1,85	300	11	103	147
5. GRÉCIA	Milho	175	107,49	1,63	300	11	69	83
6. JOHA PARAÍSO	Milho	250	100,07	2,50	300	12	69	-
7. MUNDO VERDE	Feijão	150	116,59	1,29	300	12	103	115
8. N. SRA. FÁTIMA	Gramma	350	107,00	3,27	-	11	103	97
9. NOVO MUNDO	Milho	250	120,00	2,08	250	12	69	69
10. SAPUCAÍ	Café	250	99,90	2,50	300	11	103	71
11. TABULEIRINHO	Feijão	200	104,23	1,92	250	11	103	108
Média	-	218,2	107,50	2,03	-	-	-	108,4

PNrg. = pressão nominal dos reguladores à entrada dos emissores;

$$CU_r = 100 \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i \left[D_i - \frac{\sum_{i=1}^n (D_i S_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} \right]}{\sum_{i=1}^n (D_i S_i)} \right\} \quad (1)$$

onde D_i = lâmina total coletada no ponto i (mm); S_i = distância do centro de rotação ao ponto i (m) e n = número total de coletores radialmente dispostos.

Para a caracterização da uniformidade de aplicação de água pelos equipamentos utilizou-se como base o projeto de norma n.º 04.015.08-008 da ABNT (MENDES et al., 1996). Em cada propriedade, a avaliação foi realizada com o equipamento operando em condições normais, segundo a rotina de trabalho adotada. Duas linhas radiais de coletores, linhas A e B, foram locadas com o auxílio de um teodolito. O alinhamento das mesmas foi feito de tal forma a se obter um ângulo de 3° entre elas, conforme mostra Figura 1.

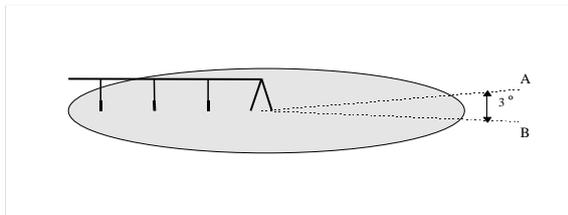


Figura 1. Esquema da área de coleta dos dados.

Coletores de água, com área de captação de 50,26 cm² e capacidade de 350 cm³, foram dispostos ao longo dos alinhamentos, em intervalos de 5 m, a partir da base do pivô. Montados em suportes, a seção de captação dos coletores ficou a aproximadamente 65 cm do solo. Em cada linha os coletores foram numerados em ordem crescente a partir do ponto pivô. A coleta de água para o teste de uniformidade foi realizada durante 60 minutos. Neste intervalo mediu-se a cada 10 minutos a temperatura e a umidade

relativa do ar bem como a velocidade do vento a 2 m de altura, por meio de uma estação meteorológica automática (modelo GroWeather, Davis Instruments Inc., USA¹).

Segundo Keller & Bliesner (1990) uma avaliação completa da uniformidade de aplicação de água por um pivô central requer a determinação da uniformidade de aplicação radial e circular. No primeiro caso, obtém-se o coeficiente de uniformidade radial CU_r (equação 1) e no segundo, o coeficiente de uniformidade circular CU_c . Este é uma medida da uniformidade de aplicação em trajetórias concêntricas e a distâncias radiais constantes do ponto pivô. O coeficiente de uniformidade do pivô CU_{pc} é obtido do produto de ambos. Neste estudo, devido às dificuldades práticas na obtenção do CU_c e à maior importância do CU_r em relação ao CU_c (KELLER & BLIESNER, 1990) em estudos de performance do equipamento, apenas o CU_r foi determinado e tomado como representativo do CU_{pc} .

Outra medida de uniformidade utilizada neste estudo é dada pela razão entre a média dos 25% menores valores de lâminas de irrigação coletadas e a correspondente lâmina média coletada, denominada de uniformidade de distribuição de água (MERRIAN & KELLER, 1978). Adaptada ao pivô central, para incorporar as diferentes faixas irrigadas pelos coletores, obtém-se um coeficiente que expressa a uniformidade de distribuição radial, UD_r (KELLER & BLIESNER, 1990), segundo a equação 2.

$$UD_r = 100 \left\{ \frac{\frac{\sum_{i=p}^q (D_i S_i)}{\sum_{i=p}^q S_i}}{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i S_i)}{\sum_{i=1}^n S_i}} \right\} \quad (2)$$

¹ A menção de empresas ou de equipamentos específicos tem efeito ilustrativo apenas, e não caracteriza recomendação expressa por parte dos autores.

onde p = primeiro elemento da série crescente de lâminas coletadas; q = elemento $n/4$ da série crescente de lâminas coletadas; n = número total de elementos da série e D e S como definidos anteriormente (equação 1).

Diferente do que ocorre para o cálculo do CU_r , a obtenção do UD_r envolve o ordenamento das lâminas coletadas, e para melhor interpretação dos resultados, quando necessário, valores aproximados de UD_r foram obtidos de CU_r e vice-versa, como se segue (KELLER & BLIESNER, 1990):

$$UD_r = 100 - 1,59(100 - CU_r) \quad (3)$$

4.3 Eficiência de aplicação de água

Neste estudo, determinou-se a eficiência em potencial de aplicação de água EA_p a partir da lâmina média coletada D_m e da lâmina bruta efetivamente aplicada D_b , segundo a equação 4. A EA_p é uma estimativa das perdas de água devido à evaporação e carreamento pelo vento.

$$EA_p = 100 \left(\frac{D_m}{D_b} \right) \quad (4)$$

onde D_m = lâmina média infiltrada no solo (mm), igual à lâmina média ponderada coletada radialmente (denominador da equação 2) e D_b = lâmina bruta efetivamente aplicada (mm).

Como a vazão do sistema foi obtida na saída da bomba, em geral, distante do ponto pivô, no cálculo de D_b assumiu-se negligível as perdas de água na tubulação de recalque até o ponto pivô. A velocidade média da água no interior da tubulação (V_m) foi obtida por meio de um tubo pitômetro com manômetro diferencial. Inicialmente determinou-se o perfil de velocidade na seção transversal do conduto, posicionando-se os "tips" do tubo Pitot nos raios medianos dos anéis de igual área em que foi dividida a seção transversal. Todo o procedimento para instalação, manuseio e obtenção de V_m baseou-se em Cruz Neto & Silva (1987). Utilizou-se um tubo pitômetro do tipo cole (Mecaltec Indústria e Comércio Ltda,

São Paulo) acoplado a um manômetro diferencial, tendo a mistura tetrabromoetano + corante, de densidade $2,9 \text{ kg dm}^{-3}$, como líquido manométrico. Com o calibrador ou galgador que acompanha o conjunto pitométrico obteve-se o diâmetro interno da tubulação. Assim, a vazão do sistema Q_s pôde ser calculada e, por conseguinte, a lâmina bruta efetivamente aplicada D_b , esta estimada como se segue:

$$D_b = \frac{Q_s T_i}{10A} \quad (5)$$

onde D_b = lâmina bruta efetivamente aplicada (mm); Q_s = vazão do sistema ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$); T_i = tempo de irrigação (h) e A = área irrigada pelo pivô central (ha) (Tabela 1).

4.4 Adequabilidade da irrigação

A adequabilidade da irrigação durante os testes foi avaliada em todas as propriedades. Considera-se adequadamente irrigada a área cuja quantidade de água aplicada satisfaz ou excede a necessidade de irrigação (KELLER & BLIESNER, 1990; FRIZZONE, 1992). Assim, define-se a percentagem de área adequadamente irrigada (PA) como a fração da área irrigada que recebeu, após um evento de irrigação, uma lâmina d'água no mínimo igual à lâmina líquida necessária para atender aos requerimentos de água das plantas.

Para determinada PA, define-se a eficiência de distribuição de água ED, também expressa em percentagem. A ED corresponde à razão entre a lâmina líquida mínima (D_n) recebida na fração da área dada por PA e a lâmina líquida média (D_m) recebida em toda a área, ou seja em 100% da área irrigada (KELLER & BLIESNER, 1990). Matematicamente, tem-se:

$$ED_{pa} = 100 \left(\frac{D_n}{D_m} \right) \quad (6)$$

onde ED_{pa} = eficiência de distribuição de água para uma dada percentagem de área adequadamente irrigada PA.

Hart & Reynolds (1965) apresentaram valores de ED_{pa} possíveis de serem obtidos a partir do conhecimento da uniformidade de distribuição de água do sistema de irrigação e da percentagem de área adequadamente irrigada que se deseja alcançar, como mostra a Tabela 2.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Lâmina aplicada e coletada

A situação ideal em termos de distribuição de água numa área irrigada requer a aplicação em toda a área de uma lâmina uniforme e igual à evapotranspiração

da cultura (ET_c), assumindo-se que a ET_c é a mesma em todos os pontos da área. Em irrigação por aspersão em geral, um padrão de aplicação de água perfeitamente uniforme não é possível devido a vários fatores relacionados ao dimensionamento do sistema (pressão, diâmetro e espaçamento dos emissores), às condições meteorológicas locais (temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento), topografia do terreno e manejo da irrigação

Na Tabela 3 são apresentados os valores da lâmina bruta aplicada D_b e da lâmina média coletada D_m durante os ensaios de campo. Em algumas propriedades, a vazão do pivô central não pôde ser obtida a partir do tubo Pitot, devido a problemas técnicos ou recusa do proprietário em autorizar a instalação do mesmo na adutora.

Tabela 2. Eficiências de distribuição de água (ED_{pa}) em função do coeficiente de uniformidade radial (CU_r) e da percentagem de área adequadamente irrigada (PA).

CU_r (%)	Percentagem de área cultivada adequadamente irrigada – PA								
	95	90	85	80	75	70	65	60	50
	Eficiências de distribuição de água – ED_{pa} (%)								
94	88	90	92	94	95	96	97	98	100
92	83	87	90	92	93	95	96	97	100
90	79	84	87	89	92	93	95	97	100
88	75	81	84	87	90	92	94	96	100
86	71	77	82	85	88	91	93	96	100
84	67	74	79	83	86	89	92	95	100
82	63	71	77	81	85	88	91	94	100
80	59	68	74	79	83	87	90	94	100
78	55	65	71	77	81	86	89	93	100
76	50	61	69	75	80	84	88	92	100
74	46	58	66	73	78	83	87	92	100
72	42	55	64	70	76	82	86	91	100
70	38	52	61	68	75	80	85	90	100
68	34	49	58	66	73	79	85	90	100

5.2 Parâmetros de desempenho da irrigação

A partir das lâminas coletadas e aplicadas, calculou-se o CU_r , a UD_r e a EA_p , cujos valores são apresentados na Tabela 4. Nas propriedades onde não se mediu a vazão do pivô, D_b não foi calculado e, por conseguinte, a EA_p . Adicionalmente são apresentadas na Tabela 4 as condições de velocidade média do vento durante os ensaios de campo.

Os parâmetros de uniformidade CU_r e UD_r são utilizados para se atribuir um valor numérico à uniformidade de aplicação de água por sistemas de irrigação por aspersão, incluindo o pivô central.

Tabela 3. Lâmina média coletada (D_m), vazão do sistema (Q_s), ajuste do percentímetro, tempo de irrigação (T_i) e lâmina bruta aplicada (D_b) em cada propriedade.

Fazenda	D_m (mm)	Q_s ($m^3 h^{-1}$)	Ajuste do percentímetro (%)	T_i (h)	D_b (mm)
1. AGRONOL	3,8	323,48	100	15,25	4,6
2. BEM BOM	4,4	-	100	12,80	-
3. CAMPO ABERTO	5,6	-	80	13,36	-
4. ESPERANÇA	3,2	-	100	8,75	-
5. GRÉCIA	9,9	533,75	70	20,18	10,0
6. JOHA PARAÍSO	4,6	433,03	100	12,42	5,4
7. MUNDO VERDE	5,8	456,60	100	15,16	5,9
8. N. SRA. DE FÁTIMA	3,3	-	100	14,33	-
9. NOVO MUNDO	4,1	419,90	100	14,30	5,0
10. SAPUCAÍ	7,0	403,46	80	17,57	7,1
11. TABULEIRINHO	3,6	316,99	100	14,86	4,5
Média	5,0	411,03	-	14,45	6,1

Tabela 4. Relação por propriedade da cultura implantada, velocidade média do vento durante os ensaios de campo e parâmetros de uniformidade e eficiência em potencial de aplicação de água.

Fazenda	Cultura	Vel. média do vento ($m s^{-1}$)	CU_r (%)	UD_r (%)	EA_p (%)
1. AGRONOL	Café	2,9	73,7	66,3	82,6
2. BEM BOM	Milho	3,7	82,7	75,9	-
3. CAMPO ABERTO	Café	-	86,4	68,4	-
4. ESPERANÇA	Feijão	3,5	83,0	78,1	-
5. GRÉCIA	Milho	3,3	88,3	84,6	99,0
6. JOHA PARAÍSO	Milho	-	84,6	77,8	85,2
7. MUNDO VERDE	Feijão	3,3	89,8	79,3	98,3
8. N. SRA. DE FÁTIMA	Gramma	2,7	67,6	60,1	-
9. NOVO MUNDO	Milho	1,0	89,4	80,2	82,0
10. SAPUCAÍ	Café	2,7	92,4	83,3	98,6
11. TABULEIRINHO	Feijão	3,7	74,8	65,0	80,0
Média	-	3,0	83,0	74,4	89,5

Para sistemas bem projetados com aspersores de impacto, valores de CU_r entre 93 e 96% são esperados e com emissores tipo “spray” espera-se valores entre 91 e 95% (KELLER & BLIESNER, 1990). No geral, valores de CU_r inferiores a 80% ($UD_r = 68\%$) não são aceitáveis. Segundo esse critério, com exceção das Fazendas AGRONOL, NOSSA SRA. DE FÁTIMA e TABULEIRINHO, em todas as demais, a uniformidade de aplicação de água foi considerada adequada (Tabela 4). Destaque para as Fazendas MUNDO VERDE e SAPUCAÍ, com $CU_r > 90\%$. Baixa uniformidade resulta em áreas sub e/ou superirrigadas dentro do campo.

A uniformidade de aplicação de água pode ser usada para comparar sistemas distintos. Observa-se que nas Fazendas AGRONOL e TABULEIRINHO e nas Fazendas BEM BOM e JOHA PARAÍSO tanto as lâminas médias coletadas D_m quanto os CU_r 's foram aproximadamente iguais. O mesmo não se verificou entre as Fazendas CAMPO ABERTO e MUNDO VERDE, onde as lâminas médias coletadas D_m foram praticamente iguais (5,6 e 5,8 mm) e os CU_r 's divergiram significativamente (86,4 e 67,6%). A implicância prática desta observação é que com sistemas de baixa uniformidade, a lâmina

bruta aplicada deve ser maior a fim de que uma dada cultura alcance a mesma produtividade (RING & HEERMANN, 1978). Portanto, sistemas de maior uniformidade fazem uso mais eficiente de água e também de produtos químicos dissolvidos na água de irrigação.

Os valores de CU_r aqui obtidos (Tabela 4) devem ser interpretados com reserva, pois se referem a um evento isolado de irrigação, uma única velocidade de rotação do pivô e um único raio do círculo molhado pelo equipamento. Uma melhor representação da uniformidade de aplicação de água poderia ser obtida com valores compostos de uniformidade determinados para mais de um evento de irrigação, sob diferentes condições de vento e velocidade de rotação. Valores compostos do CU_r e UD_r tendem a ser maiores já que os efeitos negativos do vento são suavizados no processo de composição.

Os perfis de distribuição da lâmina d'água coletada ao longo do pivô central correspondentes aos valores máximo (Fazenda SAPUCAÍ) e mínimo (Fazenda N. SRA. DE FÁTIMA) de CU_r são mostrados na Figura 2.

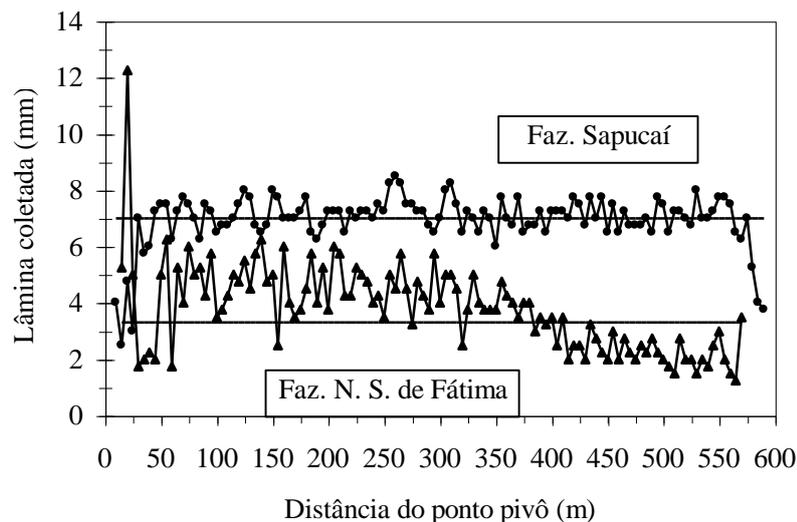


Figura 2. Variação da lâmina d'água coletada ao longo do pivô central da Fazenda SAPUCAÍ (máximo $CU_r = 92,4\%$) N. SRA. DE FÁTIMA (mínimo $CU_r = 67,6\%$).

Uma interpretação mais prática dos coeficientes de uniformidade é obtida quando se introduz o conceito de eficiência de distribuição de água ED e a percentagem de área adequadamente irrigada, PA. O valor de PA depende do tipo de cultura e aumenta das culturas de menor para as de maior rentabilidade. A obtenção de PA igual a 100% sem que isto implique em significativo desperdício de água é muito difícil de ser alcançada na prática. Com base no valor da ED determina-se a lâmina d'água extra em relação à lâmina líquida que deveria ser aplicada de modo a garantir que aquela PA receba pelo menos a lâmina líquida de irrigação e seja, portanto, adequadamente irrigada, isso sem contar as perdas por evaporação e carreamento pelo vento, que devem igualmente ser incluídas na lâmina bruta de irrigação.

Verifica-se por exemplo que para a Fazenda MUNDO VERDE ($CU_r = 90\%$), irrigar adequadamente 85% da área (valor razoável para o feijão) requer $ED = 87\%$ (Tabela 2). Por outro lado, na fazenda TABULEIRINHO ($CU_r = 75\%$) também com feijão irrigado, irrigar adequadamente 85% da área requer $ED = 67\%$. Portanto, na primeira fazenda para cada milímetro de água aplicada deveria ser adicionada uma lâmina extra de 0,15 mm enquanto que na segunda fazenda a lâmina extra seria de aproximadamente 0,50 mm. Assim, para garantir adequado suprimento de água às plantas, o bombeamento de água na Fazenda TABULEIRINHO deveria ser mais intenso, requerendo portanto maior consumo de energia em comparação com a Fazenda MUNDO VERDE.

Nas condições da Fazenda TABULEIRINHO, por exemplo, um outro problema ao garantir que 85% da área fosse adequadamente irrigada, seriam as inevitáveis perdas de água por percolação profunda (KELLER & BLIESNER, 1990) com todos os agravantes para o meio-ambiente a médio e longo prazo. Ainda segundo esses autores, valores de $CU_r < 75\%$ ($UD_r < 60\%$) são geralmente considerados relativamente baixos até mesmo para culturas graníferas e forrageiras. Para culturas de maior rentabilidade, recomenda-se $CU_r > 85\%$ ($UD_r > 76\%$).

Do ponto de vista de economia de energia para bombeamento, é viável concluir do exemplo anterior que baixos valores de $CU_r (< 80\%)$ só são aceitáveis apenas quando baixos

valores de PA ($< 70\%$) são satisfatórios. Pois quando o CU_r e a PA diminuem a ED aumenta (Tabela 2), reduzindo portanto a lâmina extra de irrigação. No entanto, são poucas as culturas para as quais baixos valores de PA são aceitáveis. Segundo Cuenca (1989), a combinação $CU_r = 70\%$ e $PA = 50\%$ é aceitável para pomares. Mas estas culturas não são vistas com frequência sob um pivô central. Para as graníferas e outras culturas que se adaptam a grandes áreas, Cuenca (1989) sugeriu como combinação mínima e razoável um $CU_r = 80\%$ e $PA = 75\%$ resultando em uma $ED = 83\%$, ou seja, uma lâmina extra de 0,20 mm/mm.

A eficiência de aplicação em potencial nas propriedades visitadas em geral foi alta, tendo variado de 80,0 a 99,0% (Tabela 4). Os maiores valores de EA_p foram obtidos nas Fazendas GRÉCIA, MUNDO VERDE e SAPUCAÍ, pois nestas a lâmina d'água infiltrada, assumida como igual à média coletada, aproximou-se da lâmina bruta aplicada, indicando reduzida perda de água por evaporação e carreamento pelo vento. Tais valores parecem contrastar com a velocidade do vento naquelas propriedades por ocasião dos ensaios de campo ($\pm 3,1 \text{ m s}^{-1}$ em média), sugerindo que pode ter havido erros na obtenção da EA_p , possivelmente ocorridos na medição da vazão bombeada.

Por outro lado, $EA_p = 80\%$ (Fazenda AGRONOL) é o limite inferior aceitável, na medida em que é significativa uma perda de 20% do que é aplicado. Redução nas perdas pela ação do vento podem ser minoradas irrigando-se de preferência durante a noite e em alguns casos posicionando os emissores abaixo da copa das plantas. Esta última alternativa no entanto, pode requerer mudanças das práticas adotadas na propriedade tendo em vista o plantio em fileiras concêntricas ao ponto pivô além de alterações nas características de design do pivô fornecidas pelo fabricante.

A lâmina líquida de irrigação não foi determinada a partir de medições do conteúdo de água armazenada no solo na zona radicular das culturas, o que permitiria a estimativa da eficiência de aplicação propriamente dita EA e por extensão, da eficiência de armazenamento de água no solo e das perdas por percolação profunda. A análise conjunta de parâmetros de eficiência e uniformidade dá uma idéia melhor sobre a qualidade da irrigação que se pratica. Analisando-

se os dados da Tabela 4, verifica-se que nas Fazendas AGRONOL e TABULEIRINHO baixos coeficientes de uniformidade estão associados a razoáveis valores de EA_p , indicando que deficiência hídrica às plantas pode ocorrer, caso esta tendência se verifique em outros eventos de irrigação.

6 CONCLUSÕES

Os sistemas pivô central testados apresentaram em geral níveis aceitáveis de uniformidade de aplicação de água (maior ou igual a 80%) com o que é possível a obtenção de alta eficiência de distribuição de água, para um mínimo de 80% de área adequadamente irrigada. Ainda assim, significativos acréscimos na lâmina líquida de irrigação podem ser necessários, especialmente para culturas de maior rentabilidade, a exemplo do café, para as quais uma maior percentagem de área adequadamente irrigada é esperada. A eficiência em potencial de aplicação também apresentou valores aceitáveis (acima de 80%).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by sprinkling. **California Agricultural Experimental Station Bulletin**, Berkeley, n. 670, 1-124, 1942.
- CRUZ NETO, J. C. da; SILVA, R. T. V. da. **Manual de pitometria**. Salvador: Empresa Baiana de Águas e Saneamento, 1987. 139 p.
- CUENCA, R.H. **Irrigation system design: an engineering approach**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1989. 552 p.
- FRIZZONE, J.A. **Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Departamento de Engenharia Rural, 1992. 53 p. (Série Didática, 3).
- HART, W.E.; REYNOLDS, W.N. Analytical design of sprinkle systems. **Transactions of the ASAE**, 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 ASAE**, St. Joseph, v.11, n.1, p.11-15, 1968.
- HEERMANN, D.F.; KOHL, R.A. Fluid dynamics of sprinkler systems. In: JENSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1983. p.583-618.
- HEINEMANN, A.B. **Influência do espaçamento entre coletores, do número de linhas radiais e altura do emissor no coeficiente de uniformidade de Christiansen para pivô central**. 1996. 64 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.
- JACINTO, L.U. A pecuária do futuro com a ajuda da irrigação. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 51, p.50-54, 2001.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.
- MENDES, T.A. et al. **Determinação da uniformidade de distribuição de água em equipamentos de irrigação mecanizada (pivô central e lateral móvel), providos de emissores fixos e rotativos**. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996. 8 p. (Projeto de Norma - ABNT 04:015.08-008).
- MERRIAN, J.L.; SHEARER, M.N.; BURT, C.M. Evaluating irrigation systems and practices. In: JENSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1983. p.721-760.
- MERRIAM, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. 3ed. Logan: Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State University, 1978. 285 p.
- PAIR, C.H. et al. **Irrigation**. Arlington: The Irrigation Association, 1983. 686 p.
- RING, L; HEERMANN, D.F. Determining center-pivot sprinkler uniformities. In: 1978 SUMMER MEETING OF THE ASAE, 1978, Logan, Utah. **Anais...** St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1978. 19 p. (Technical Paper, 78-2001)