



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p719-726>

## Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste de sprays de placa oscilante

Alberto Colombo<sup>1</sup>, Lessandro C. Faria<sup>2</sup>, João J. da Silva Junior<sup>3</sup>, José A. do V. Sant'Ana<sup>3</sup>, Samuel Beskow<sup>2</sup> & Bernardo G. Nörenberg<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia/Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG. E-mail: [acolombo@deg.ufla.br](mailto:acolombo@deg.ufla.br)

<sup>2</sup> Centro de Desenvolvimento Tecnológico/Engenharia Hídrica/Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, RS. E-mail: [lessandrofaria@yahoo.com.br](mailto:lessandrofaria@yahoo.com.br) (Autor correspondente); [samuelbeskow@gmail.com](mailto:samuelbeskow@gmail.com)

<sup>3</sup> Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas/Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG. E-mail: [jjsjunior1@yahoo.com.br](mailto:jjsjunior1@yahoo.com.br); [zinhojaves@yahoo.com.br](mailto:zinhojaves@yahoo.com.br)

<sup>4</sup> Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos/Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, RS. E-mail: [bernardo.norenberg@hotmail.com](mailto:bernardo.norenberg@hotmail.com)

### Palavras-chave:

pivô central  
ensaios de campo  
deriva

### RESUMO

Dentre os diversos fatores que influenciam as perdas de água por evaporação e arraste (PEA) destaca-se o vento. Sendo assim, os objetivos deste trabalho foram: i) determinar os valores de PEA decorrentes de onze avaliações de um sistema de irrigação do tipo pivô central; ii) gerar um modelo para estimativa de PEA a partir de variáveis explicativas; iii) avaliar modelos de predição disponíveis na literatura para estimar PEA a partir de ensaios de campo. Os ensaios foram realizados ao longo de um vão de 48 m, situado entre a quarta e quinta torre de um pivô central de 432,57 m de raio, equipado com sprays de placa oscilante modelo I-Wob. As PEA foram simuladas em função de cinco modelos empíricos propostos na literatura sendo ainda ajustado um modelo específico para a condição estudada. As avaliações de campo em diferentes condições meteorológicas demonstraram que os valores das PEA obtidos com modelos existentes na literatura apresentaram índices de adequabilidade insatisfatórios para as condições estudadas porém o modelo de PEA ajustado apresentou menores erros quando comparado aos modelos existentes, podendo ser utilizado para condições operacionais e climáticas semelhantes às observadas neste estudo.

### Key words:

center pivot  
field test  
wind drift

## Modeling of evaporation and wind drift losses in rotating spray plate sprinklers

### ABSTRACT

Among several factors that exert influence on evaporation and wind drift losses (EWL), the wind has attracted researcher's attention in scientific studies. In this context, the objectives of this study were: i) to determine EWL that occurred in eleven field tests with a center pivot system; ii) to develop a model to estimate EWL in function of predictor variables; iii) to evaluate prediction models available in literature for estimation of EWL from data acquired in the field trials. The tests were carried out along a 48-m span located between the fourth and fifth tower of a center pivot of 432.57 m in length, equipped with a model of rotating spray plate sprinklers known as I-Wob. Evaporation and wind drift losses were simulated using five empirical models. Additionally, a specific model was developed for the operational and meteorological conditions observed in this study. It was found that the empirical models presented unsatisfactory performance indices when they were tested for the operational and meteorological conditions observed in this study. The errors obtained from the adjusted model were lower than those observed when using the existing models. Thus, this model can be used for conditions similar to those experienced in this study.

## INTRODUÇÃO

Em muitas regiões do Brasil a irrigação pode ser considerada como uma tecnologia indispensável para produção de alimentos, situação passível de ser atribuída sobretudo aos baixos índices de precipitação e à sua distribuição irregular.

Os sistemas de irrigação do tipo pivô central têm sido amplamente utilizados nas condições brasileiras porém em muitos casos, por serem dimensionados sem levar em consideração sua utilização em condições climáticas adversas, acabam por não operar com a sua máxima eficiência, desperdiçando água e energia de bombeamento.

De acordo com Playán et al. (2005), na irrigação por aspersão uma parte da água aplicada pelo sistema não atinge o dossel das culturas e/ou a superfície do solo. Esta parcela de água perdida é denominada PEA e é expressa como porcentagem de volume bruto irrigado. Esses pesquisadores afirmam ainda que o diâmetro da gota e o do bocal do emissor são as variáveis operacionais que mais influenciam nas PEA, sendo que as gotas maiores são mais resistentes à deriva e apresentam menor área por unidade de massa e, conseqüentemente, são menos afetadas pelo vento, resultando menores PEA, corroborando com os resultados obtidos por Beskow et al. (2011) e Faria et al. (2012).

Diversos fatores podem afetar as PEA em sistemas de irrigação por aspersão. De acordo com Tarjuelo et al. (2000), as perdas por evaporação dependem da temperatura e da umidade relativa do ar, da velocidade do vento, da altura de instalação do emissor de água acima da superfície do solo, da pressão de serviço no emissor e do diâmetro de gota formado junto à saída do emissor. Já as perdas por deriva dependem, de acordo com Ortiz et al. (2009), da velocidade do vento, do diâmetro de gota e da distância que as gotas percorrem até atingir a superfície do solo ou o dossel da cultura.

Heinemann et al. (1998) e Evangelista et al. (2010) também salientam que fatores como evaporação, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento afetam diretamente a uniformidade de distribuição da água de pivô central. Além desses, fatores operacionais como a pressão de serviço do emissor, a velocidade e o alinhamento da linha lateral do equipamento e a altura de instalação do emissor, também influenciam.

Sistemas de irrigação devem ser economicamente viáveis ao produtor rural e para isto cabe, ao projetista e ao irrigante, minimizar os custos por unidade produzida. Sendo assim, conhecer o desempenho de um equipamento de irrigação principalmente em relação a índices de uniformidade de distribuição de água e à lâmina de água aplicada, é de grande importância para tomada de decisões que permitam a economia de água, de energia e de fertilizantes, quando aplicados.

Diversos estudos (Edling, 1985; Faci et al., 2001; Playán et al., 2004; 2005; Kincaid, 2005; Beskow et al., 2008; 2011; Ortiz et al., 2009; Stambouli et al., 2013) vêm sendo realizados em diferentes partes do mundo com o intuito de modelar as PEA em sistemas de irrigação por aspersão.

Ortiz et al. (2009) realizaram estudos para caracterizar as PEA em sistemas de irrigação por pivô central, equipados com emissores do tipo spray de placa fixa e spray de placa oscilante

(modelo I-Wob), em diferentes condições de vento, na região de Albacete, Espanha. Os autores observaram que as PEA foram menores, variando entre 3,3% (irrigação noturna) e 8,2% (irrigação diurna) para emissores do tipo spray de placa oscilante, instalados a 1,0 m de altura da superfície do solo, quando comparados com spray de placa fixa, instalados a 2,5 m de altura da superfície do solo, cujas PEA variaram entre 8% (irrigação noturna) e 13,7% (irrigação diurna).

Objetivando avaliar, entre outros fatores, as perdas de água por evaporação e arraste (PEA), relacionadas com a velocidade do vento em emissores do tipo spray de placa fixa e spray de placa oscilante, Playán et al. (2004) desenvolveram um equipamento experimental de irrigação que reproduzia a seção de um pivô central. Em seus resultados os autores observaram que, para velocidades de vento variando entre 0,19 e 4,93 m s<sup>-1</sup>, as PEA variaram entre 0,3 e 8,3% e observaram ainda que para velocidades de vento até 1,5 m s<sup>-1</sup>, e emissores dispostos a 2,4 m de altura de elevação da superfície do solo, há variação reduzida das PEA entre os emissores spray de placa oscilante modelos I-Wob e Nelson R3000.

Playán et al. (2004) também observaram que há relação entre velocidade do vento e as PEA, o que independe do emissor de água utilizado (spray de placa fixa e spray de placa oscilante), e que uma das vantagens dos sprays de placa oscilante é a perda reduzida por escoamento superficial devido ao aumento do diâmetro molhado pelo emissor e à redução na intensidade de aplicação de água. Além disso, os autores demonstram a necessidade de mais pesquisas nesta área incluindo comparações de avaliações diurnas e noturnas das PEA (Playán et al., 2005; Ortiz et al., 2009) e a ampliação na gama de valores de velocidade de vento em ensaios de campo.

Neste contexto o estudo teve, como objetivos: i) determinar as perdas de água por evaporação e arraste (PEA) em um sistema de irrigação por pivô central usando emissores tipo spray de placa oscilante, em diferentes condições climáticas; ii) avaliar a capacidade preditiva de cinco modelos de estimativa de perdas por evaporação e arraste (PEA) e iii) desenvolver um modelo de predição de PEA em função dos dados de ensaios de campo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em um equipamento de irrigação do tipo pivô central situado na Fazenda Invernada, município de Bom Sucesso, MG. O equipamento utilizado é da marca Valley, raio total irrigado de 432,57 m, composto de quatro lances longos e quatro lances médios com diâmetro 6 5/8", e um lance em balanço de 20 m, sem canhão final.

O sistema está equipado com reguladores de pressão com valor nominal de 68,9 kPa (10 psi) e emissores de água do tipo spray de placa oscilante, da marca Senninger modelo I-Wob, com contrapeso, espaçados entre si de 2,30 m, montados na extremidade de tubos de descida flexíveis (pendurais), a uma altura de 1,80 m da superfície do solo. De acordo com as especificações técnicas do fabricante, o pivô central em questão apresenta vazão igual a 240,7 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, sendo capaz de completar um giro de 360° em um tempo mínimo de 9,24 h aplicando, em uma área irrigada de 58,78 ha, a lâmina bruta de 3,78 mm.

De forma análoga ao estudo conduzido por Ortiz et al. (2009), neste trabalho, conforme indicado pela Eq. 1, as perdas de água por evaporação e arraste (PEA) foram determinadas com base na diferença entre a lâmina média aplicada (LMA, em mm) no quinto vão da lateral móvel, que foi calculada com base na vazão dos 21 emissores instalados neste vão, e a lâmina média coletada (LMC, em mm) sob este mesmo quinto vão:

$$PEA_{\alpha} = \left( \frac{LMA_{\alpha} - LMC_{\alpha}}{LMA_{\alpha}} \right) \times 100 \quad (1)$$

em que:

$PEA_{\alpha}$  - perdas de água por evaporação e arraste no quinto vão do pivô observadas na posição angular  $\alpha$  da lateral móvel, %;

$LMA_{\alpha}$  - Lâmina média aplicada pelos emissores do quinto vão do pivô na posição angular  $\alpha$  da lateral móvel, mm; e

$LMC_{\alpha}$  - Lâmina média coletada sob o quinto vão do pivô na posição angular  $\alpha$  da lateral móvel, mm.

De acordo com os índices apresentados na Eq. 1, as determinações das PEA foram realizadas em diferentes locais da área irrigada pelo quinto vão da lateral móvel, que foram caracterizados por diferentes posições angulares da linha lateral móvel, conforme ilustrado na Figura 1. A utilização desses locais distintos permitiu que, em função do intervalo de tempo requerido pelo deslocamento da linha lateral, as diferentes determinações das PEA fossem realizadas em condições variadas de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento.

As variáveis meteorológicas pertinentes ao estudo foram registradas durante os ensaios de campo, que ocorreram tanto no período diurno quanto no período noturno, por meio de uma estação meteorológica portátil, marca Davis, modelo Monitor II. A estação foi instalada a uma altura de 2 m em relação à superfície do solo, junto ao ponto do pivô e foi programada para armazenar, em intervalos regulares de 30 s, os valores médios de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento.

Visando permitir a recuperação das condições meteorológicas observadas durante a aplicação de água nas linhas de coletores

dispostas nas diferentes posições angulares, o deslocamento da lateral móvel do pivô foi monitorado durante os ensaios, de forma sincronizada com o relógio da estação meteorológica determinando-se, em cada posição angular, os horários de início e término da aplicação de água nos coletores.

Conforme esquematizado na Figura 1, em cada uma das posições angulares do pivô central onde foram efetuadas as determinações das PEA, foram instaladas duas linhas radiais de coletores (LA e LB) ao longo dos 48 m de distância entre o final da quarta torre e o início da sexta torre. Essas linhas de coletores foram dispostas formando um ângulo de abertura, suficiente para manter uma distância de 10 m entre a extremidade final das duas linhas de coletores localizada na trilha da quinta torre.

Em cada uma das linhas (LA e LB), foram instalados 23 coletores de água sustentados por hastes metálicas, regularmente espaçadas 2 m permitindo manter a borda superior dos coletores a uma altura de 0,8 m da superfície do solo. Os coletores utilizados eram de plástico, modelo Fabrimar, apresentando uma área de captação de 0,08 m de diâmetro que, de acordo com Playán et al. (2005), é um diâmetro adequado para determinação das perdas de água por evaporação e arraste sob condições de velocidades de vento de até 4,5 m s<sup>-1</sup>.

Nas diferentes posições angulares de amostragem o volume de água aplicado em cada coletor foi mensurado com uma proveta de vidro graduada com precisão de  $\pm 1$  cm<sup>3</sup> e com capacidade de 50 cm<sup>3</sup>, imediatamente após o término da aplicação de água em cada coletor; posteriormente, esses valores foram convertidos em lâmina de água e utilizados na Eq. 2 para o cálculo da lâmina média de água coletada ( $LMC_{\alpha}$ ) sob o quinto vão da linha lateral móvel.

$$LMC_{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{i=23} [rc_i \cdot (LA_{i,\alpha} + LB_{i,\alpha})]}{2 \cdot \sum_{i=1}^{i=23} rc_i} \quad (2)$$

em que:

$rc_i$  - raio de instalação do coletor de índice  $i$ , m;

$LA_{i,\alpha}$  - lâmina no coletor de índice  $i$  da linha LA da secção de amostragem  $\alpha$ , mm; e

$LB_{i,\alpha}$  - lâmina no coletor de índice  $i$  da linha LB da secção de amostragem  $\alpha$ , mm.

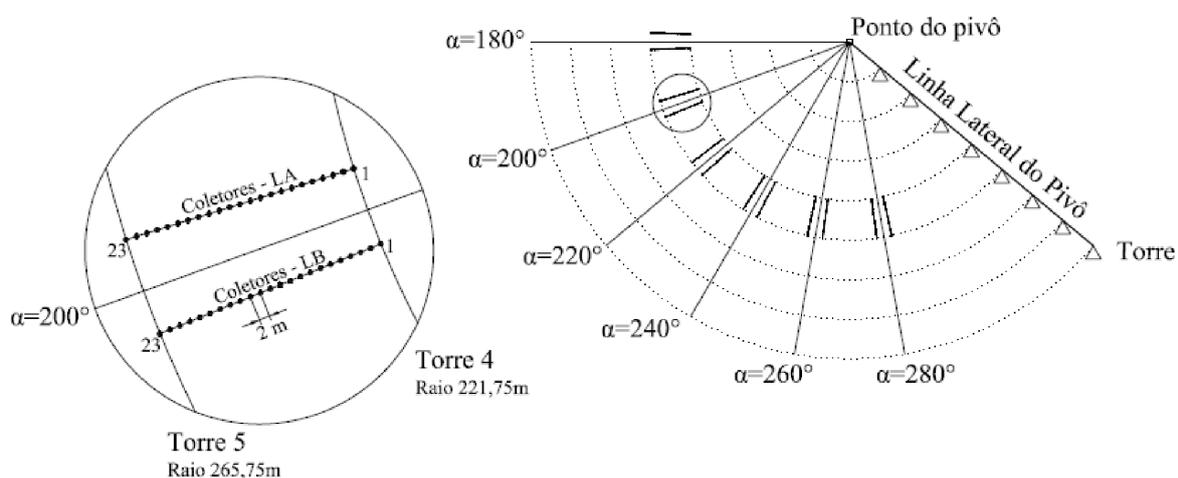


Figura 1. Esquema das posições angulares da lateral do pivô central com detalhe da disposição das linhas de coletores utilizadas para determinação das perdas por evaporação e arraste

Para determinação da lâmina média aplicada pelos emissores instalados no quinto vão do pivô (LMA<sub>α</sub>) foi determinado, inicialmente, o raio de giro de cada um dos 21 emissores deste vão (R<sub>j</sub> com 2 ≤ j ≤ 22). Além disso, foram determinados, também, o raio de giro do último emissor do vão anterior (R<sub>j=1</sub>) e o raio de giro do primeiro emissor do vão posterior (R<sub>j=23</sub>). Com base nesses valores de raio de giro foi possível determinar a área de cobertura (A<sub>i</sub>, com 1 ≤ i ≤ 21) de cada um dos 21 emissores modelo I-Wob do quinto vão do pivô central, Eq. 3:

$$A_i = \frac{\pi}{4} \left[ (R_{j=i+1} + R_{j=i+2})^2 - (R_{j=i+1} + R_{j=i})^2 \right], \text{ com } 1 \leq i \leq 21 \quad (3)$$

em que:

A<sub>i</sub> - área de cobertura do emissor de índice i do quinto vão do pivô central, m<sup>2</sup>; e

R<sub>j</sub> - raio de giro do emissor de índice j, que tem início em j = 1, no último emissor do quarto vão (R<sub>j=1</sub>), e término em j = 23, no primeiro emissor (R<sub>j=23</sub>) do sexto vão do pivô central, m.

O tamanho dos bocais de todos os 21 emissores I-Wob instalados no quinto vão do pivô central também foi identificado encontrando-se, neste levantamento: sete bocais de número 16,5; cinco bocais de número 16,0; sete bocais de número 17,0 e dois bocais de número 17,5. Tratando-se de um equipamento relativamente novo, com menos de seis meses de uso, retiraram-se apenas duas amostras de cada um dos quatro diferentes diâmetros de bocais encontrados ao longo do quinto vão do equipamento, junto com suas respectivas válvulas reguladoras de pressão, sendo as amostras do conjunto válvula reguladoras de pressão/emissor levadas para ensaios de laboratório.

No Laboratório de Irrigação (DEG/UFLA), foram determinados pares de valores de vazão do aspersor versus logaritmo Neperiano da carga de pressão na entrada da válvula reguladora de pressão que, posteriormente, foram usados para ajustar os parâmetros (a e b) da Eq. 4, representativa de cada um dos quatro diâmetros de bocais encontrados no quinto vão do pivô central.

$$Q_i = a_i \cdot \ln(H_{i,\alpha}) + b_i \quad (4)$$

em que:

Q<sub>i</sub> - vazão do emissor i, m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>

H<sub>i,α</sub> - valor numérico da carga de pressão no emissor i, mca; e

a<sub>i</sub> e b<sub>i</sub> - coeficientes empíricos da equação vazão versus pressão do emissor de índice i, m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Para possibilitar o uso da Eq. 4 na estimativa da vazão dos emissores durante o período de aplicação de água nos coletores das diferentes posições angulares, a distribuição espacial da pressão ao longo da lateral móvel foi monitorada continuamente por meio de sete transdutores de pressão com datalogger. Os mencionados transdutores de pressão foram instalados no ponto do pivô e em 6 hastes de descida dos emissores (pendurais), localizadas em posições imediatamente anteriores às primeira, segunda, terceira, quinta, sétima e oitava torres do equipamento.

As tomadas de pressão dispostas nos pendurais foram instaladas em posição imediatamente anterior às válvulas reguladoras de pressão de 68,9 kPa (10 psi). Os valores de carga de pressão registrados ao longo do período de aplicação de água nas linhas de coletores (LA e LB) foram utilizados para fixar os parâmetros de uma Spline Cúbica (Burden & Faires, 2013) que permitiu a determinação da carga média de pressão em cada um dos 21 emissores spray de placa oscilante modelo I-Wob. Desta forma, a lâmina média aplicada (LMA<sub>α</sub>) pelos emissores do quinto vão foi determinada por meio da Eq. 5.

$$LMA_\alpha = \frac{1000 \cdot \frac{PT5}{VT5_\alpha} \sum_{i=1}^{i=21} \left\{ R_{i+1} \left[ \frac{b_i + a_i \ln(H_{i,\alpha})}{A_i} \right] \right\}}{\sum_{i=2}^{i=22} R_i} \quad (5)$$

em que:

PT5 - perímetro da quinta torre, 1379,47 m; e

VT5<sub>α</sub> - velocidade de deslocamento da torre 5 durante a aplicação de água secção de amostragem α, m h<sup>-1</sup>.

Além disso, simulações das perdas de água por evaporação e arraste para as mesmas condições meteorológicas (temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento), observadas durante os ensaios de campo com o equipamento pivô central, foram realizadas para os modelos propostos na literatura por Playán et al. (2004; 2005), Ortiz et al. (2009), Beskow et al. (2011), Eqs. 6, 7, 8, 9 e 10 (Tabela 1).

Para a modelagem das PEA e mediante os onze ensaios de campo do equipamento pivô central, foi utilizado o modelo geral para estimativa das perdas de água por evaporação e arraste (PEA) recomendado por Playán et al. (2004; 2005) e Ortiz et al. (2009), Eq. 11.

$$PEA = m + n \cdot V \quad (11)$$

em que:

V - velocidade do vento, m s<sup>-1</sup>; e

m e n - parâmetros de ajuste do modelo.

Tabela 1. Modelos empíricos utilizados nas simulações das perdas de água por evaporação e arraste (PEA)

Autor/Localidade	Sistema de irrigação	Equação	R <sup>2</sup>	Eq.
Playán et al. (2004)/ Zaragoza - ES	Simulador de pivô central	PEA = 1,55 + 1,13 . V	0,57	6
Playán et al. (2005)/ Zaragoza - ES	Simulador de pivô central	PEA = 2,7 + 2,31 . V	0,60	7
Ortiz et al. (2009)/ Albacete - ES	Pivô central	PEA = 0,95 + 1,91 . V	0,58	8
Playán et al. (2005)/ Zaragoza - ES	Simulador de pivô central	PEA = -2,1 + 1,91 . V + 0,231 . T	0,93	9
Beskow et al. (2011)/ Lavras, MG - BR	Convencional	PEA = -0,0304Ps + 13,2976Δe <sup>0,5</sup> + 5,485 . V	0,82	10

PEA - Perdas por evaporação e arraste (%); T - Temperatura (°C); V - Velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>); Δe - Déficit de pressão de vapor (kPa); Ps - Pressão de serviço do aspersor (kPa)

A adequação dos resultados de perda de água por evaporação e arraste (PEA) gerados com os diferentes modelos de simulação foi avaliada seguindo-se as recomendações de Beskow et al. (2011), no sentido de se determinar o índice de confiança de desempenho ( $c$ ) de Camargo & Sentelhas (1997), que é obtido pela multiplicação do coeficiente de correlação ( $r$ ) pelo índice de Willmott ( $d$ ), conforme apresentado nas Eqs. 12 e 13.

$$c = r \cdot d \quad (12)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (13)$$

em que:

$P_i$  - valor estimado;

$O_i$  - valor observado;

$O$  - média dos valores observados.

O índice de confiança de desempenho foi avaliado segundo escala proposta por Camargo & Sentelhas (1997): ótimo ( $c > 0,85$ ); muito bom ( $0,76 \leq c \leq 0,85$ ); bom ( $0,66 \leq c \leq 0,75$ ); mediano ( $0,61 \leq c \leq 0,65$ ); sofrível ( $0,51 \leq c \leq 0,60$ ); mau ( $0,41 \leq c \leq 0,50$ ); e péssimo ( $c \leq 0,40$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 podem ser observados os valores obtidos de lâmina de água aplicada e coletada (mm), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa (%), velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e perdas de água por evaporação e arraste (PEA em %), em diferentes seções de amostragem ( $\alpha$  em graus) da linha lateral do pivô central avaliado.

Os valores observados nos ensaios de campo, de velocidade média da quarta e quinta torres, foram de 66,02 e 80,45  $\text{m h}^{-1}$ , respectivamente, sendo o perímetro e o raio, para a quarta e quinta torres, iguais a 1379,47 e 1681,07 m e 219,55 e 267,55 m, respectivamente. A pressão de operação no ponto do pivô de 303,5 kPa e no final da tubulação de 127,5 kPa.

O tempo de giro do equipamento, determinado nos ensaios de campo com percentímetro regulado em 50% (17,23 h) foi inferior ao projeto pelo fabricante (18,48 h), o que demonstra

que o equipamento está operando acima da velocidade projetada, fato que explica o porquê do valor médio da lâmina aplicada no ensaio (7,132 mm), Tabela 2, ter sido inferior ao da lâmina prevista em projeto (7,560 mm).

No período de realização dos onze ensaios de campo a temperatura do ar variou entre de 16,0 e 29,3  $^{\circ}\text{C}$ , com valor médio de 22,95  $^{\circ}\text{C}$ . A umidade relativa do ar variou de 46,93 a 91,34%, com valor médio de 71,39%. A velocidade do vento variou entre 0,07 e 3,34  $\text{m s}^{-1}$ , com valor médio entre todos os ensaios de 1,28  $\text{m s}^{-1}$ . A lâmina de água coletada variou entre de 6,401 e 7,126 mm, com lâmina média de 6,891 mm.

Os valores de perda de água por evaporação e arraste (PEA) variaram entre 0,20 e 9,99%, com valor médio de 3,38%, valores esses próximos aos de Playán et al. (2004) que, para as condições climáticas de Zaragoza - Espanha, obtiveram valores de PEA variando entre 0,3 e 8,3%, com velocidades de vento variando entre 0,19 e 4,93  $\text{m s}^{-1}$ .

É possível observar ainda, Tabela 2, que no período diurno os valores das PEA foram superiores aos valores observados no período noturno corroborando com os resultados obtidos por Playán et al. (2005). Neste estudo não foram gerados modelos distintos para os períodos diurno e noturno, como sugerido por Playán et al. (2005), devido ao número reduzido de ensaios de campo do equipamento pivô central. Ressalta-se, ainda, que gerar modelos distintos de PEA para períodos diurnos e noturnos é uma lacuna para futuras pesquisas que, em muitos casos, não são realizadas em virtude das dificuldades para a realização de ensaios de campo de sistemas pressurizados de irrigação.

A relação entre a velocidade do vento e as perdas de água por evaporação e arraste (PEA) do equipamento pivô central equipado com emissores spray de placa oscilante modelo I-Wob, pode ser observada na Figura 2.

Observa-se, na Figura 2, que a reta ajustada aos valores observados em ensaios de campo com o equipamento pivô central em estudo apresentou um coeficiente angular maior quando comparado aos resultados obtidos por Playán et al. (2004) e por Ortiz et al. (2009).

O valor do coeficiente de determinação obtido a partir dos dados observados em ensaios de campo ( $R^2 = 0,76$ ) foi superior ao obtido por Playán et al. (2004), Eq. 6, com spray de placa fixa e oscilante ( $R^2 = 0,57$ ), ao obtido por Playán et al. (2005), através da Eq. 7 ( $R^2 = 0,60$ ) e ao obtido por Ortiz

Tabela 2. Valores obtidos de perdas de água por evaporação e arraste (PEA), temperatura (T), umidade relativa (UR), velocidade do vento (V) e lâmina média de água aplicada (LMA) e coletada (LMC) durante os ensaios de campo

Data do ensaio	Posição do pivô central - $\alpha$ (graus)	Tempo (h)	LMA (mm)	LMC (mm)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	UR (%)	V ( $\text{m s}^{-1}$ )	PEA (%)
08/10/2011	30	1:47-2:04	7,136	6,996	17,23	87,00	1,40	1,96
08/10/2011	360/0	3:13-3:30	7,119	7,105	16,74	89,33	0,07	0,20
08/10/2011	330	4:39-4:56	7,108	7,080	16,00	91,34	0,16	0,39
08/10/2011	300	6:05-6:23	7,109	6,787	17,18	90,57	2,38	4,53
08/10/2011	270	7:31-7:49	7,112	6,401	19,39	83,70	3,34	9,99
12/11/2011	280	10:33-10:51	7,149	7,018	25,40	69,78	0,64	1,83
12/11/2011	260	11:34-11:49	7,148	6,678	25,66	69,00	1,56	6,58
12/11/2011	240	13:12-13:31	7,137	6,836	27,75	55,08	1,24	4,22
12/11/2011	220	14:10-14:28	7,137	6,999	28,86	53,76	0,83	1,93
12/11/2011	200	15:05-15:25	7,141	6,770	29,30	48,90	1,36	5,20
12/11/2011	180	16:06-16:26	7,152	7,126	28,97	46,93	1,05	0,36
Média	-----	-----	7,132	6,891	22,95	71,39	1,28	3,38

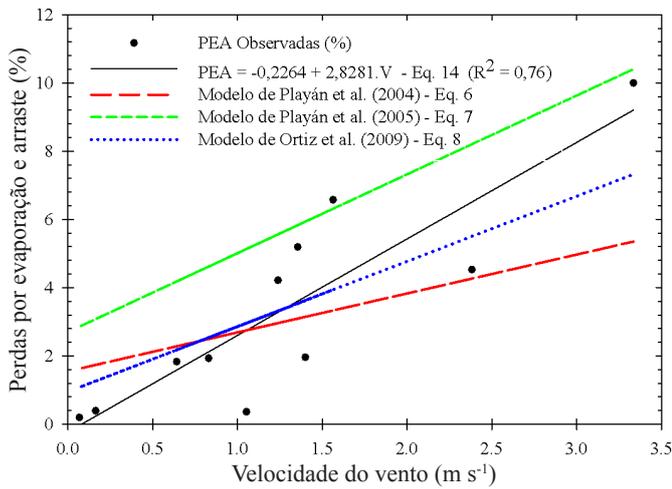


Figura 2. Relação entre as perdas por evaporação, arraste e a velocidade do vento do pivô central equipado com emissores spray de placa oscilante modelo I-Wob

et al. (2009), com spray de placa oscilante ( $R^2 = 0,58$ ), Eq. 8. Ressalta-se que, de acordo a Playán et al. (2004), os baixos valores de  $R^2$  podem ser atribuídos ao reduzido número de coletores de água utilizados durante os ensaios de campo para determinação das PEA.

Os resultados de perda de água por evaporação e arraste (PEA) simulados com os modelos empíricos de Playán et al. (2004), Playán et al. (2005), Ortiz et al. (2009) e Beskow et al. (2011) podem ser observados na Figura 3.

O modelo proposto por Playán et al. (2004), os quais utilizaram uma máquina experimental que simula um pivô central, apresentou desempenho de acordo com índice proposto por Camargo & Sentelhas (1997), considerado “Mau” ( $c = 0,51$ ), quando utilizado com os dados obtidos em ensaios de campo do equipamento pivô central avaliado neste estudo (Figura 3A).

A simulação das PEA com o modelo de Playán et al. (2005), Eq. 7, apresentou desempenho classificado, de acordo com o mesmo índice, como “Sofrível” ( $c = 0,56$ ), conforme pode ser observado na Figura 3B. As limitações dos modelos de Playán et al. (2004; 2005) podem ser atribuídas ao fato de que esses modelos foram gradados com uma máquina experimental que simula um equipamento de irrigação a qual operou com condições diferentes às observadas neste estudo.

Utilizando o modelo proposto por Ortiz et al. (2009), Figura 3C, para um sistema de irrigação do tipo pivô central, equipado com spray de placa oscilante, condição operacional mais próxima à observada neste estudo, obteve-se um índice de Camargo & Sentelhas (1997) classificado como “Mediano” ( $c = 0,61$ ).

Também utilizando uma máquina experimental de irrigação porém considerando a temperatura do ar como variável, Playán et al. (2005), Eq. 9, encontraram um índice de Camargo & Sentelhas (1997) classificado como “Sofrível” ( $c = 0,58$ ), conforme observado na Figura 3D. O ajuste

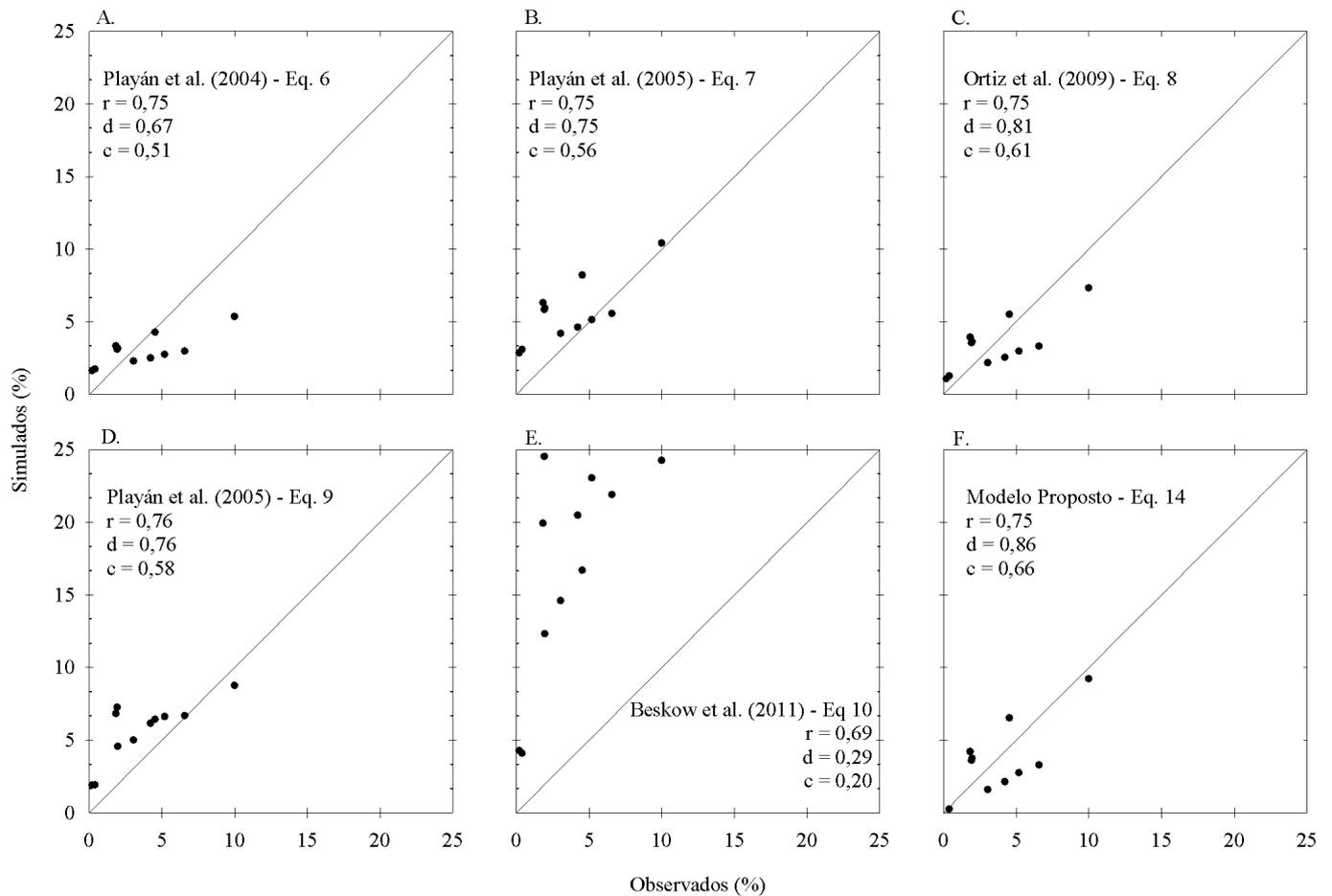


Figura 3. Valores de perdas de água por evaporação e arraste (PEA) observados em ensaios de campo de um pivô central, equipado com spray de placa oscilante I-Wob, versus valores simulados por modelos propostos na literatura

inadequado deste modelo pode ser atribuído ao fato desses autores terem utilizado a máquina experimental e não um equipamento de irrigação; além disto, consideraram outra variável meteorológica (temperatura) no estudo e não somente a velocidade do vento; já com o modelo proposto por Beskow et al. (2011), para sistemas convencionais de aspersão, obteve-se uma classificação considerada “Péssima”, com um valor de índice “c” igual a 0,20 (Figura 3E). Este resultado pode ser explicado pelo fato de se tratar de equipamentos de irrigação diferentes e possuírem distintas condições operacionais de diâmetro de bocal, pressão de serviço, raio de alcance e disposição de aspersores no campo, dentre outros. Cabe ressaltar que o modelo proposto por Beskow et al. (2011), ainda que os autores destaquem que sua aplicabilidade em condições semelhantes de aspersores foi testada por se tratar de um modelo gerado para condições climáticas (Lavras, MG) próximas as observadas neste estudo (Bom Sucesso - MG).

Os modelos existentes para simulação de perdas por evaporação e arraste (PEA) testados neste estudo (Playán et al., 2004, 2005; Ortiz et al., 2009 e Beskow et al., 2011) não apresentaram uma boa adequação aos resultados observados nos ensaios de campo do equipamento pivô central, equipado com spray de placa oscilante modelo I-Wob, para as condições de Bom Sucesso - MG; assim, foi proposto um modelo linear para os dados observados em ensaios de campo deste estudo (Eq. 14), no qual foram relacionadas as perdas de água por evaporação e arraste (PEA em %) com a velocidade do vento ( $m\ s^{-1}$ ).

$$PEA = -0,2264 + 2,8281 \cdot V \quad (14)$$

O modelo gerado neste estudo para prever as PEA, Eq. 14, foi obtido seguindo recomendações de Playán et al. (2004; 2005) e Ortiz et al. (2009), sendo a análise de adequação observada na Figura 3F. O modelo proposto apresentou índice “c” de Camargo & Sentelhas (1997) igual a 0,66, sendo classificado como “Bom”. Entretanto, é de suma importância considerar os seguintes aspectos: i) esses resultados se aplicam às condições operacionais e climáticas observadas neste estudo; ii) um número maior de ensaios de campo poderia resultar em um índice de adequabilidade mais elevado; iii) gerar modelos distintos no período diurno e no noturno provavelmente resultaria em maiores índices de adequabilidade.

## CONCLUSÕES

1. Os valores de PEA obtidos por meio de simulações com modelos existentes na literatura apresentaram índices de adequabilidade classificados como “péssimo”, “mal”, “sofrível” e “mediano”, para as condições estudadas.

2. A escolha correta de um modelo para estimativa das PEA é de grande importância devendo-se, para isto, levar em consideração as condições operacionais e meteorológicas em que os modelos foram gerados.

3. O modelo de estimativa das PEA proposto apresentou melhor adequação aos dados observados e, portanto, pode ser utilizado para condições operacionais e climáticas semelhantes.

## AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG, pelo auxílio financeiro na aquisição dos equipamentos e materiais (Processo N° CAG-APQ-01954-09) utilizados neste estudo.

## LITERATURA CITADA

- Beskow, S.; Colombo, A.; Ribeiro, M. S.; Ferreira, L. S.; Rossi, R. Simulação das perdas de água por evaporação e arraste, no aspersor NY-7 (4,6 x 4,0 mm), em sistemas de aspersão convencional. *Engenharia Agrícola*, v.28, p.427-437, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000300004>
- Beskow, S.; Faria, L. C.; Colombo, A.; Moura, D. C. M. Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste em aspersores de média pressão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.221-228, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000300001>
- Burden, R. L.; Faires, J. D. *Análise numérica*. São Paulo: Cengage Learning, 2013. 721p.
- Camargo, A. P. de; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, p.89-97, 1997.
- Edling, R. J. Kinetic energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzles. *American Society of Agricultural Engineers*, v.28, p.1543-1549, 1985.
- Evangelista, W.; Oliveira, C. A. S.; Silva, C. L. Variáveis climáticas e o desempenho de um pivô central em cristalina Goiás. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.246-252, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000300002>
- Faci, J. M.; Salvador, R.; Playán, E.; Sourell, H. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.127, p.224-233, 2001. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2001\)127:4\(224\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2001)127:4(224))
- Faria, L. C.; Beskow, S.; Colombo, A.; Oliveira, H. F. E. de. Modelagem dos efeitos do vento na uniformidade da irrigação por aspersão: Aspersores de tamanho médio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.133-141, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000200002>
- Heinemann, A. B.; Frizzone, J. A.; Pinto, J. M.; Feitosa Filho, J. C. Influência da altura do emissor na uniformidade de distribuição da água de um sistema tipo pivô central. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.9, p.1487-1491, 1998.
- Kincaid, D. C. Application rates from center pivot irrigation with current sprinkler types. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v.21, p.605-610, 2005. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.18570>
- Ortiz, J. N.; Tarjuelo, J. M.; Juan, J. A. Characterization of evaporation and drift losses with center pivots. *Agricultural Water Management*, v.96, p.1541-1546, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.015>
- Playán, E.; Garrido, S.; Faci, J. M.; Galán, A. Characterizing pivot sprinklers using an experimental irrigation machine. *Agricultural Water Management*, v.70, p.177-193, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2004.06.004>
- Playán, E.; Salvador, R.; Faci, J. M.; Zapata, N.; Martínez-Cob, A.; Sánchez, I. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agricultural Water Management*, v.76, p.139-159, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.01.015>

- Stambouli, T.; Martinez-Cob, A.; Faci, J. M.; Howell, T., Zapata, N. Sprinkler evaporative losses in alfalfa during solid-set sprinkler irrigation in semiarid-areas. *Irrigation Science*. v.31, p.1075-1889, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-012-0389-2>
- Tarjuelo, J. M.; Ortega, J. F.; Montero, J.; Juan, J. A. Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, v.43, p.263-284, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00066-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00066-9)