

RODRIGO DAL-SASSO LOURENÇO

**MODELAGEM DAS PERDAS POR EVAPORAÇÃO E ARRASTE EM
EMISSORES DE PLACA DEFLETORA FIXA E ROTATIVA OSCILANTE NA
IRRIGAÇÃO VIA PIVÔ CENTRAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

L892m
2018

Lourenço, Rodrigo Dal Sasso, 1990-

Modelagem das perdas por evaporação e arraste em emissores de placa defletora fixa e rotativa oscilante na irrigação via pivô central / Rodrigo Dal Sasso Lourenço. – Viçosa, MG, 2018.

vi, 51 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Everardo Chartuni Mantovani.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 49-51.

1. Irrigação agrícola. 2. Irrigação agrícola - Equipamento e acessórios - Avaliação. 3. Água - Distribuição. I. Universidade

CDD 22. ed. 631.587

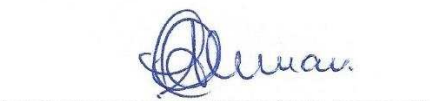
RODRIGO DAL-SASSO LOURENÇO


**MODELAGEM DAS PERDAS POR EVAPORAÇÃO E ARRASTE EM
EMISSORES DE PLACA DEFLETORA FIXA E ROTATIVA OSCILANTE
NA IRRIGAÇÃO VIA PIVÔ CENTRAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de julho de 2018.


Gustavo Haddad Souza Vieira


Catariny Cabral Aleman


Everardo Chartuni Mantovani
(Orientador)

DEDICATÓRIA

Dedico esta vitória à minha mãe Imaculada Conceição Teixeira Dal Sasso por sempre me apoiar e acreditar nos meus projetos, e ao meu avô Maurício Dal Sasso (in memoriam) por ser o meu maior ídolo e exemplo.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa – UFV, por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade da realização do curso.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola e ao Departamento de Fitotecnia que disponibilizaram a área experimental e o equipamento de irrigação para o estudo.

Aos funcionários da Unidade de Ensino Pesquisa e Extensão do DFT de Coimbra – MG, pelo suporte e acolhida para a realização deste experimento.

Ao professor Everardo Chartuni Mantovani pela valiosa orientação, ensinamentos e experiências compartilhadas.

Aos professores Fernando França da Cunha e Antônio Policarpo Souza Carneiro pelos ensinamentos e pela valiosa contribuição.

À empresa Senninger por fornecer todo o material para a execução deste experimento e todo o suporte técnico.

À empresa Irriger que acreditou e incentivou a pesquisa e financiou grande parte deste estudo.

Ao grande amigo e estagiário Gunter Wilde Callegaro, que foi de extrema importância para a realização deste experimento.

Aos amigos do Grupo de Estudo e Soluções em Agricultura Irrigada – GESAI, em especial o muito obrigado à Francisco Cássio Alvino, que não mediu esforços para colaborar nos ensaios de campo noturno.

À minha namorada Samyra Alves Condé, que trabalhou arduamente durante a execução do experimento e me apoiou durante essa jornada.

À todos da minha família que me incentivaram e apoiaram nesta jornada, em especial minha mãe Imaculada e meu irmão Rafael Dal Sasso Lourenço, que sempre estiveram ao meu lado.

RESUMO

LOURENÇO, Rodrigo Dal Sasso, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2018. **Modelagem das perdas por evaporação e arraste em emissores de placa defletora fixa e rotativa oscilante na irrigação via pivô central.** Orientador: Everardo Chartuni Mantovani.

A adoção de sistemas de irrigação de aspersão via pivô central tem crescido a taxas elevadas e vem se destacando pela grande autonomia, facilidade de operação e manutenção, tornando o sistema muito flexível e competitivo quanto à adoção de diferentes estratégias de manejo e tecnologias. Seu desempenho está estritamente relacionado às variáveis intrínsecas do sistema e das variáveis meteorológicas do local de instalação. Desta forma o presente trabalho possui os seguintes objetivos: (i) Avaliar as variáveis meteorológicas nas perdas por evaporação e arraste (PEA) da irrigação por pivô central; (ii) Avaliar a influência do tipo de emissor (emissor de placa fixa ou placa defletora rotativa oscilante) nas perdas por evaporação e arraste e suas respectivas uniformidades de distribuição, (iii) Avaliar alguns modelos existentes para estimar as perdas por evaporação e arraste, (iv) Ajustar e validar um modelo para estimativa das perdas por evaporação e arraste em sistemas de irrigação por pivô central. Para isso, foram realizados ensaios de precipitação a campo com emissores de placa defletora fixa - Super Spray Senninger® (PDF) e emissores de placa defletora rotativa oscilante - Iwob Senninger® (PDRO). Foram observados resultados de uniformidade de distribuição variando de 85 % a 97% com valores médios de 92,8% para emissores PDRO, e 79,9% a 94,20% com um valor médio de 89,8% para emissores PDF. Considerando a eficiência de aplicação os emissores PDRO se mostraram com um desempenho mais satisfatório, com valores de PEA variando de 0,1% a 24,5% com um valor médio de 10,7%, enquanto que para os emissores PDF os resultados se concentraram em um intervalo de 1,3% a 35,7% e um valor médio de 14%. Foram ajustadas duas equações distintas para estimar as PEA em função da velocidade do vento e de acordo com o tipo de emissor. A velocidade do vento foi a única variável independente que se mostrou significativa estatisticamente, e se comportou linear e positivamente em relação as PEA. As equações possuem um intercepto (β_0) idêntico, o que nos explica que em condições de baixa velocidade do vento (próximo de 0ms^{-1}) as PEA são idênticas, porém a variável independente exerceu maior influência em emissores de placa fixa. Dentre os modelos já existentes, o modelo de Dechmi et al. (2003) apresenta classificação boa para ambos os emissores. Para os emissores com placa defletora fixa, outros três modelos obtiveram uma classificação boa, são eles: Yacoubi et al. (2010), Sanchez et al. (2011) e Ortiz et al. (2015).

ABSTRACT

LOURENÇO, Rodrigo Dal Sasso, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2018. **Wind drift evaporation losses modeling in fixed and rotating plate spray sprinklers in irrigation by center pivot.** Advisor: Everardo Chartuni Mantovani.

The adoption of sprinkler irrigation systems by the center pivot has grown at high rates and has been highlighted by the great autonomy, ease of operation and maintenance, making the system very flexible and competitive in adopting different management strategies and technologies. Their performance is closely related to the system's intrinsic variables and meteorological variables of the installation site. In this way the present study has the following objectives: (i) To evaluate the meteorological variables in the wind drift evaporation losses (WDEL) in a center pivot system; (ii) Evaluate the influence of the type of sprinkler (fixed deflector plate and oscillating rotary deflector plate) on the WDEL and their respective distribution uniformities, (iii) Evaluate some existing models to estimate WDEL, (iv) adjusting and validating a model for estimation WDEL in center pivot irrigation systems. For this, field precipitation tests were performed with the fixed deflector plate sprinklers (Super Spray Senninger®) and oscillating rotary deflector plate sprinklers (Iwob Senninger®). Results of distribution uniformity ranging from 85% to 97% with mean values of 92.8% for oscillating rotary plate sprinklers were obtained, whereas for the fixed plate sprinklers the results were between 79.9% to 94.2% with an average value of 89.8%. Considering the application efficiency, the sprinklers with oscillating rotary plate showed a more satisfactory performance, with values of WDEL varying from 0.1% to 24.5% with an average value of 10.7%, whereas for the fixed plate sprinklers the amplitude was slightly higher with losses within a range of 1.3% to 35.7% and an average value of 14%. Two different equations were fitted to estimate wind drift evaporation losses as a function of wind speed and according to the type of sprinkler. The wind speed was the only independent variable that was statistically significant, and behaved linearly and positively in relation to the WDEL. The equations have an identical intercept (β_0), which explains that in conditions of low wind speed (close to 0ms^{-1}) the WDEL are identical, but the independent variable wield a greater influence on. Among the models studied, the model of Dechmi et al. (2003) presents a good rating for both sprinklers. For the fixed deflector plate sprinkler, three other models obtained a good classification, they are: Yacoubi et al. (2010), Sanchez et al. (2011) and Ortiz et al. (2015).

SUMÁRIO

1.	Introdução	01
2.	Objetivos	04
2.1	Objetivo Geral	04
2.2	Objetivos Específicos	04
3.	Revisão de Literatura	04
3.1	Eficiência de Irrigação	04
3.2	Perdas por Evaporação e Arraste	06
3.3	Modelos Empíricos para estimativa das Perdas por Evaporação e Arraste	07
3.4	Tecnologia de Aplicação – Evolução dos Emissores para Pivô central	10
4.	Material e Métodos	12
4.1	Caracterização da Área Experimental	12
4.2	Descrição do Sistema de Irrigação	13
4.3	Determinação das Vazões dos Emissores e a lâmina média do pivô central	14
4.4	Ensaio de Precipitação	15
4.5	Modelagem das Perdas por Evaporação e Arraste	16
4.6	Análise de Identidade de Modelos	17
4.7	Comparação com os modelos existentes	18
4.8	Análise da Uniformidade de Distribuição	19
5.	Resultados e Discussão	20
5.1	Vazões e lâmina média coletada	20
5.2	Desempenho dos Emissores	22
5.2.1	Emissores com Placa Defletora Rotativa Oscilante	22
5.2.2	Emissores com Placa Defletora Fixa	26
5.3	Comparativo da Uniformidade de Distribuição entre os dois tipos de emissores	30
5.4	Modelagem das Perdas por Evaporação e Arraste – Emissores de Placa Defletora Rotativa Oscilante	31
5.5	Modelagem das Perdas por Evaporação e Arraste - Emissores de Placa defletora fixa	35
5.6	Comparação do Desempenho dos Emissores em relação as Perdas por Evaporação e Arraste	37
5.7	Análise de Identidade de Modelos	41
5.8	Comparação com outros modelos empíricos para estimativa das perdas por evaporação e arraste	44
6.	Conclusões	48
7.	Referências Bibliográficas	49

1. Introdução

Reconhece-se cada vez mais a crescente demanda por alimentos associada à uma escassez de recursos naturais, fazendo-se necessário a prática de uma agricultura mais sustentável e eficiente, principalmente no âmbito da agricultura irrigada, que vem se expandindo mundialmente e é responsável por uma parcela considerável da produção de alimentos e respectivamente um elevado consumo de água. Observa-se que a expansão da área de agricultura irrigada está atrelada diretamente aos conflitos atuais e potenciais pelo uso da água, juntamente com a necessidade de um dimensionamento mais racional e um manejo adequado, com uma aplicação cada vez mais eficiente, inteligente, sustentável e rentável. Com isso torna-se necessário a discussão e o desenvolvimento de tecnologias além de estratégias de manejo que possam minimizar as perdas e aumentar a eficiência de irrigação.

Devido à essa demanda por alimentos e o crescimento acelerado da população, a adoção de sistemas de irrigação no Brasil e no Mundo vem se expandindo significativamente. Além da elevada demanda por maiores produções e produtividades, os benefícios da prática da agricultura irrigada são muito claros e imediatos, o que favorece ainda mais a adoção desta prática. Destaca-se algumas vantagens como o aumento de produtividade na ordem de 2 a 3 vezes em relação à agricultura de sequeiro, redução do custo unitário de produção, possibilidade de otimização do uso do solo durante todo o ano, aumento na oferta de alimentos e outros produtos agrícolas com regularidade ao longo do ano, atenuação dos fatores relacionados à sazonalidade climática e conseqüentemente uma redução do fator risco, preços mais favoráveis ao produtor rural, maior qualidade e padronização dos produtos agrícolas, possibilidade de utilização de quimigação, fertirrigação e aplicação em taxa variável (ANA & Embrapa, 2016).

Além de apresentar todos esses benefícios de forma isolada, a implementação da prática da irrigação vem acompanhada de outras melhorias em serviços, equipamentos, insumos e práticas agrícolas, o que torna a agricultura irrigada ainda mais elaborada e exigente de um manejo diferenciado. O sistema de irrigação via pivô central, além de atender todas as vantagens mencionadas acima, ainda se destaca pela grande autonomia, facilidade de operação e manutenção, o que torna o sistema muito flexível e competitivo quanto à adoção de diferentes estratégias de manejo.

Estima-se que o Brasil se encontra com 6,95 milhões de hectares irrigados, figurando-se entre os 10 países com maior área equipada para irrigação no Mundo, ficando atrás dos líderes mundiais como China e Índia com 70 milhões de hectares cada,

seguido por Estados Unidos, Paquistão e Irã, com 26,7, 20 e 8,7 milhões de hectares respectivamente (ANA, 2017). Nas últimas décadas o incremento da área de agricultura irrigada no Brasil vem crescendo persistentemente e consideravelmente. De acordo com dados do “Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil” (ANA & Embrapa, 2016), a adoção à sistemas de irrigação no Brasil tem crescido a taxas médias anuais de 4,4% a 7,3% desde a década de 1960, tendo uma maior concentração (68% da área) nos estados São Paulo, Rio Grande do Sul, Bahia, Minas Gerais e Goiás. Além dos imensuráveis benefícios da irrigação, outros fatores como: Expansão da agricultura para regiões com clima desfavorável, estímulos governamentais de desenvolvimento regional, expansão do mercado de irrigação, além de uma boa disponibilidade de crédito e financiamento, tem colaborado significativamente para a adoção e aumento das áreas com sistemas de irrigação.

Tratando-se da ampliação das áreas com cultivos irrigados, destaca-se o sistema de irrigação por aspersão via pivô central. Segundo o levantamento divulgado pela Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação (CSEI) da Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ), a área irrigada por sistemas de pivô central no Brasil é de aproximadamente 1,4 milhões de hectares, cerca de 20 mil equipamentos. Seu crescimento pode ser percebido quando analisamos a área irrigada do Brasil em 2016, com cerca de 5,623 milhões de hectares, um aumento de 4% comparado ao ano de 2015 que contava com uma área de 5,404 milhões de hectares. Desse incremento total (218,5 mil hectares) cerca de 48% (105 mil hectares) se deu pela adoção do sistema de irrigação via pivô central (Adaptado de CSEI ABIMAQ, 2015).

Todavia, considerando a área agrícola total, a extensão territorial e a expansão das fronteiras agrícolas, juntamente com os fatores físicos-climáticos favoráveis e a boa disponibilidade hídrica, a área irrigada no Brasil pode ser considerada pequena frente ao potencial estimado. Diferentemente dos países que ocupam as primeiras colocações no ranking de maior área irrigada, que já estão próximo do potencial máximo de exploração. Tornando o Brasil um dos principais países em potencial para expandir sua área irrigada.

A partir do projeto de cooperação técnica executado pela fundação de estudos Agrários Luiz de Queiroz -FEALQ, juntamente com Instituto Interamericano de Cooperação para Agricultura – IICA e o Ministério da Integração Nacional – MI, foi elaborado o estudo “Análise Territorial para o Desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil” (BRASIL, 2014) onde foi avaliado o potencial da expansão da agricultura irrigada no país. A partir das análises realizadas, chegaram ao valor potencial de expansão

de 76,19 milhões de hectares, valor esse que foi classificado em 3 diferentes classes: Irrigáveis com alta aptidão 21,80 Milhões de hectare; irrigáveis com média aptidão 25,86 Milhões de hectares; irrigáveis com baixa aptidão 28,53 Milhões de hectares;

Além desses expressivos valores potenciais de expansão da área irrigada no Brasil, os equipamentos pivôs centrais ganham um maior destaque quando observamos uma tendência a médio prazo, considerando um horizonte de 15 anos prevê-se que o número de pivôs centrais será mais do que o dobro de atualmente. Estima-se que esse número irá saltar de 1,394 milhões de hectares no ano de 2015 para 2,885 milhões de hectares no ano de 2030, um incremento de 107 % nas áreas irrigadas com pivô central, enquanto a área total irrigada irá sofrer um incremento de 3,14 milhões de hectares nos próximos 15 anos, saindo de 6,95 para 10,09 milhões de hectares, representando um aumento de 47 % (Brasil, 2014).

Concomitantemente ao expressivo aumento da área de agricultura irrigada e principalmente na adoção do sistema de irrigação por aspersão via pivô central em grandes áreas, a preocupação e o desenvolvimento de novas tecnologias e estratégias de manejo veem sendo desenvolvidas e adotadas no âmbito de se otimizar o uso racional dos recursos hídricos, fomentando um aumento na eficiência do sistema, consequentemente reduzindo os desperdícios e gerando uma maior rentabilidade e sustentabilidade da agricultura irrigada.

Por muitos anos, o termo manejo da agricultura irrigada foi omitido das discussões e negligenciado na prática do campo. Devido à conflitos e pressões pelo uso da água, custos de energia elevado e uma melhor percepção dos benefícios agronômicos que um manejo eficiente pode trazer para o sistema, a discussão sobre o manejo da agricultura irrigada se tornou realidade e necessidade em muitos casos. Uma parte importante que deve ser considerada em um sistema de irrigação desde a concepção do projeto até na parte de manejo, é a eficiência de irrigação. Tema este, que muitas vezes é confundido com eficiência de aplicação ou eficiência de distribuição, e muitos não sabem mensurar, interpretar e ou utilizar dessa informação.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Busca-se sempre um aumento da eficiência e a uniformidade de distribuição do sistema, e conseqüentemente minimizar as perdas por evaporação e arraste. Tais perdas podem ser mensuradas através de testes de campo, os quais normalmente demandam tempo e mão de obra, o que não os tornam interessante operacionalmente e viáveis economicamente. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo geral ajustar um modelo para estimativa das perdas de água por evaporação e arraste na irrigação por pivô central em emissores de placas defletoras fixas e placas defletoras rotativas oscilantes, para a região de Viçosa, Minas Gerais.

2.2. Objetivos Específicos

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos: (i) Avaliar a importância das variáveis meteorológicas nas perdas por evaporação e arraste da irrigação por pivô central; (ii) Avaliar a influência do tipo de emissor (emissor de placa fixa ou placa defletora rotativa oscilante) nos sistemas de irrigação por pivô central, avaliando as perdas por evaporação e arraste e suas respectivas eficiências de aplicação, (iii) Avaliar alguns modelos existentes para estimar as perdas por evaporação e arraste, comparando os valores estimados com os medidos em campo.

3. Revisão de Literatura

3.1. Eficiência de Irrigação

A escolha de um método e ou sistema de irrigação deve ser baseada na viabilidade técnica e econômica do projeto, devendo ser considerado entre outros aspectos a uniformidade de distribuição e a eficiência de aplicação do sistema a ser utilizado (Bernardo et al., 2006). Reduzidos valores de uniformidade de distribuição e de eficiência de aplicação acarretam em uma eficiência de irrigação não satisfatória, gerando um maior consumo de água e energia, além de promover perdas significativas de produção e outros danos ao cultivo. Com isso faz-se necessário uma maior discussão em torno da eficiência de irrigação, visando elaborar estratégias de projeto e manejo que possam minimizar tais perdas e garantir uma melhor eficiência do sistema.

De acordo com Bernardo et al. (2006), a eficiência de um sistema de irrigação por pivô central, é constituída de modo prático, por dois fatores principais (Equação 1): a eficiência de distribuição de água, que depende da fração da área suficientemente irrigada que se pretende atingir e da uniformidade de aplicação de água; e da eficiência de aplicação potencial, que reflete as perdas por evaporação e arraste da água. Essas eficiências ajustam a necessidade de água de um evento de irrigação considerando as perdas que existem pela desuniformidade do sistema, perdas essas, intrínsecas ao próprio sistema de irrigação e ou decorrentes da influência das variáveis meteorológicas.

$$E_i = 100 * \left\{ \frac{E_a}{100} * \frac{E_d}{100} \right\} \quad (\text{Equação 1})$$

E_i = Eficiência de irrigação, %

E_a = Eficiência de aplicação, %

E_d = Eficiência de distribuição, %

A análise da uniformidade de aplicação é comumente realizada através de testes de campo e a partir do cálculo do coeficiente de uniformidade de Christiansen – CUC (Christiansen, 1942) que adota o desvio médio absoluto como medida de dispersão. O coeficiente de uniformidade demonstra a variabilidade da lâmina da irrigação na superfície do solo e é influenciado principalmente pelos fatores intrínsecos ao sistema, como: pressão de serviço, espaçamento e altura dos emissores, tipo de emissor e conseqüentemente o perfil de distribuição de água. Além desses fatores, a variável meteorológica velocidade do vento também exerce influência no desempenho da uniformidade de distribuição do sistema.

A eficiência de aplicação potencial reflete as perdas causadas pela evaporação da água e pela deriva e arraste das gotas pelo vento no trajeto entre os emissores e o alvo a ser irrigado. Smajstrla e Zazueta (2003) afirmam que as gotas arrastadas pelo vento podem evaporar enquanto estão sendo transportadas ou cair fora da área irrigada, constituindo perdas em ambos os casos, já que a água não fica disponível para as plantas que estão sendo irrigadas. Por outro lado, Ortíz et al. (2009) consideram que a porção da água arrastada que cai nas bordas da área cultivada e a retida pelo dossel não podem ser completamente consideradas perdas, pois contribuem para a redução da evapotranspiração. De acordo com Colombo et al. (2015), o conhecimento do desempenho de um sistema de irrigação, em relação aos índices de eficiência de distribuição e eficiência de aplicação é extremamente relevante e útil no processo de tomada de decisão, o que vai possibilitar de maneira direta um uso mais racional e eficiente de água, energia e fertilizantes.

3.2. Perdas por evaporação e arraste

A discussão sobre o termo perdas por evaporação e arraste é complexa e pode gerar diferentes interpretações e aplicações. De maneira geral, durante um evento de irrigação por aspersão, parte da água que é aspergida pelo sistema não chega à superfície do solo ou a parte aérea da planta, esse montante de água que é perdido durante a aplicação é chamado de perdas por evaporação e arraste (PEA). É de suma importância a mensuração de tais perdas, tanto no âmbito econômico, ambiental ou produtivo. Todavia, a estimativa dessas perdas é uma tarefa complexa, em virtude das técnicas necessárias e das dificuldades operacionais (Beskow et al. 2011). Para a determinação de tais perdas, faz-se necessário ensaios de precipitação para a coleta da lâmina e em seguida verifica-se a relação entre a lâmina coletada com a lâmina aplicada. Este método é o mais utilizado e recomendado pela maioria dos pesquisadores, como Playán et al. (2005), Sanchez et al. (2011) e Bernardo et al. (2006).

De acordo com Keller e Bliesner (1990) gotas de diâmetros mais elevados são mais resistentes à deriva e apresentam uma menor área por unidade de massa, como consequência, sofrem menos influência das perdas por evaporação e arraste. Outra variável do sistema que influencia diretamente nas PEA é a pressão de serviço, que de acordo com o estudo apresentado por Montero et al. (2003) essa variável apresenta uma relação inversa, quanto maior a pressão de serviço, menor será o diâmetro da gota e consequentemente maior serão as PEA.

Dechmi et al. (2003) destacam a importância da variável altura do emissor, uma vez que quanto mais alto em relação ao solo o emissor estiver instalado, maior será a trajetória das gotas até alcançar a superfície, aumentando o tempo de exposição das partículas de água às variáveis climáticas, principalmente a velocidade do vento, aumentando assim os valores de PEA. No entanto, observa-se a necessidade de se trabalhar com os emissores instalados a uma altura mínima que assegure uma correta sobreposição das lâminas, de forma a obter uma maior uniformidade de aplicação e uma melhor cobertura da área cultivada.

As influências das variáveis intrínsecas ao sistema em relação às PEA podem ser evitadas e ou minimizadas, garantindo assim uma maior eficiência de irrigação. Todavia, as variáveis meteorológicas atuam de forma mais significativa e podem trazer resultados não satisfatórios de eficiência de irrigação. De acordo com Tarjuelo et al. (2000) as variáveis meteorológicas que mais exercem influência sobre as PEA, são: velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa e déficit de pressão de vapor. Seginer (1971)

considerou a variável radiação solar e Keller e Bliesner (1990) introduziram a evapotranspiração de referência, que de forma indireta engloba todas as variáveis consideradas acima.

Tarjuelo et al. (2000) classificaram as perdas em dois grupos distintos, as perdas por evaporação e as perdas por arraste. As perdas por evaporação dependem principalmente das variáveis: umidade relativa, temperatura do ar e da água, velocidade do vento, altura do emissor, pressão de serviço e diâmetro de gota. No entanto, quando se considera as perdas por arraste, observa-se uma influência somente das variáveis velocidade do vento, diâmetro de gota e altura dos emissores, que irá determinar a trajetória que a gota d'água terá até alcançar a superfície do solo ou a parte aérea da planta, conseqüentemente o tempo que esta gota ficará susceptível aos efeitos da variável velocidade do vento.

3.3. Modelos Empíricos para estimativa das perdas por evaporação e arraste

Diversos modelos estão descritos na literatura, vários autores estudaram as influências das variáveis intrínsecas do sistema e das variáveis meteorológicas em diferentes sistemas de irrigação e condições meteorológicas. Para a estimativa das PEA, diversos autores desenvolveram modelos que consideram as influências das variáveis intrínsecas do sistema e meteorológicas em diferentes sistemas de irrigação e condições de clima. Verifica-se que todos os modelos encontrados na literatura utilizam a velocidade do vento para explicar as PEA (Dechmi et al., 2003; Ortíz et al., 2009; Colombo et al., 2015). Mas algumas pesquisas revelam que outras variáveis meteorológicas também contribuem para a modelagem das PEA. Tarjuelo et al. (2000) e Tarjuelo (2005) verificaram que o déficit de pressão de vapor contribuiu para estimar as PEA, especialmente em condições de baixa velocidade do vento. Sanchez et al. (2011) verificaram que além da velocidade do vento, a temperatura do ar também contribuiu para o modelo de predição das PEA. Yacoubi et al. (2010) propuseram um modelo preditivo para a região da Aritânia, Tunísia, considerando a umidade relativa e velocidade do vento como as variáveis independentes explicativas do modelo. Esses e demais modelos estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis meteorológicas e intrínsecas dos sistemas de irrigação selecionadas para modelar as perdas por evaporação e arraste.

Autores	Variáveis do sistema				Variáveis meteorológicas					
	D _{bocal}	D _{gota}	H	P	V _v	T	UR	DPV	Rs	ET ₀
Seginer (1971)					x	X	x		x	
Yazar (1984)				x	x	X		x		
Trimmer (1987)	x			x	x			x		
Keller e Bliesner (1990)	x			x	x					X
Faci e Bercero (1991)					x					
Tarjuelo (1995)		x			x	X	x			
Montero (1999)				x	x			x		
Tarjuelo et al. (2000)	x	x	X	x	x			x		
Faci et al. (2000)	x				x	X				
Dechmi et al. (2003)					x					
Playán et al. (2004)					x					
Playán et al. (2005)					x	X	x			
Ortíz et al. (2009)					X					
Yacoubi et al. (2010)					X		x			
Sanchez et al. (2011)					X	x				
Ortiz et al. (2015)					X					
Colombo et al. (2015)					X					

As variáveis consideradas são: D_{bocal} (diâmetro do bocal), D_{gota} (diâmetro da gota), h (altura do emissor), P (pressão de serviço), V_v (velocidade do vento), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa), DPV (déficit de pressão de vapor), Rs (radiação solar) e ET₀ (evapotranspiração de referência).

Playán et al. (2005) avaliaram o desempenho de um sistema fixo e de uma linha lateral em movimento, encontrando resultados diferentes para as avaliações diurnas e noturnas. Foram propostas diferentes equações para explicar e prever as perdas por evaporação e arraste. A maioria das equações valeu-se apenas da velocidade do vento como variável independente, apesar de algumas usarem umidade relativa ou uma combinação das duas variáveis mais a temperatura do ar. As perdas ficaram em torno de 15,4 e 8,5%, no sistema fixo, para períodos diurnos e noturnos, respectivamente; e de 9,8% para o dia e 5,0% para a noite, no sistema móvel. Observaram também que a velocidade do vento foi a melhor variável para prever as perdas por evaporação e arraste durante o dia, tanto para o sistema fixo quanto para o móvel. Alguns modelos usam ainda o déficit de pressão de vapor para simular essas perdas, sendo que Tarjuelo et al. (2000) e Tarjuelo (2005) o consideram útil especialmente quando a velocidade do vento é baixa.

Ortíz et al. (2009), conduziram um estudo durante 3 anos em uma área irrigada por pivô central em Albacete, Espanha, avaliando emissores com placas defletoras fixas e rotativas, em diferentes alturas e horários de aplicação. Os valores médios das perdas por evaporação e arraste para irrigações diurnas com emissor a 2,5 m acima do solo e placa defletora fixa foram de 13,6 %, com valor máximo de 26,1%. Para as irrigações

noturnas com emissores a 1 m da superfície do solo e com placa rotativa, obtiveram valores médios de 3,3%, com valor máximo de 8,3%. Neste trabalho, os modelos propostos para prever as perdas por evaporação e arraste tanto em eventos noturnos quanto diurnos foram melhor explicados apenas pela velocidade do vento, embora os autores afirmem que outros fatores também influenciam esse processo.

De acordo com os estudos em condições noturnas e diurnas conduzidos por Playán et. al (2005) mostraram que, para aspersores com placa rotativa, as perdas encontradas à noite foram da ordem de 62% menores que as diurnas. Resultados estes semelhantes aos encontrados por Ortíz et al. (2009). Estes autores encontraram uma redução de 75% nas perdas das irrigações diurnas com aspersores de placa defletora fixa para irrigações noturnas com aspersores de placa rotativa.

Dechmi et al.(2003) elaboraram um modelo para as condições meteorológicas de Zaragoza (Espanha), utilizando um sistema de aspersão convencional com aspersores de impacto. Os autores encontraram valores de PEA variando de 6,0 a 40%, com um modelo utilizando somente a variável velocidade do vento, além disso o modelo se mostrou inadequado para situações com baixa velocidade de vento, superestimando as perdas nessas situações. Sanchez et al. (2011) também desenvolveram um modelo preditivo utilizando um sistema de aspersão convencional para a mesma região de Zaragoza, porém considerou além da variável velocidade do vento a variável climática temperatura.

Outros experimentos foram realizados em diferentes regiões, destacando-se o trabalho de Yacoubi et al.(2010) que propôs um modelo preditivo para a região da Aritânia, Tunísia, considerando as condições meteorológicas diurnas e um sistema de aspersão convencional. Os autores observaram valores médios de PEA de aproximadamente 24%, e considerou as variáveis umidade relativa e velocidade do vento como as variáveis independentes explicativas do modelo.

Colombo et al. (2015) desenvolveram um modelo empírico para as condições meteorológicas do município de Bom Sucesso no estado de Minas Gerais, Brasil. Para este estudo, foi utilizado um equipamento pivô central equipado com reguladores de pressão com valor nominal de 69kPa e emissores com placa defletora rotativa oscilante instalados à uma altura de 1,80 metros em relação a superfície do solo. As perdas observadas se concentraram em um intervalo entre 0,2 a 9,9 % e um valor médio de 3,38%. Foi observado que as irrigações no período diurno apresentaram uma maior perda comparado com irrigações noturnas. Para esse modelo, foi considerada somente a variável velocidade do vento.

3.4. Tecnologia de aplicação – Evolução dos emissores para pivô central

A adoção de sistemas de irrigação de aspersão via pivô central tem crescido a taxas elevadas, e vem se destacando pela grande autonomia, facilidade de operação e manutenção, tornando o sistema muito flexível e competitivo quanto à adoção de diferentes estratégias de manejo e tecnologias. Junto a esse crescimento da utilização deste sistema de irrigação outras tecnologias vêm surgindo paralelamente a este avanço de forma complementar.

Nas últimas décadas, várias tecnologias de aplicação foram desenvolvidas no âmbito da irrigação via pivô central. Inicialmente, estes equipamentos eram projetados com emissores de impacto, que eram instalados nas saídas na parte aérea e demandavam alta pressão de serviço (acima de 138 kPa), gerando um elevado consumo de energia, reduzidos valores de eficiência de irrigação e projetos que muitas vezes não eram economicamente viáveis. Com o passar do tempo e o surgimento de novas demandas e tecnologias, foram desenvolvidos os emissores de baixa pressão de placa defletora fixa. Tais emissores já trabalhavam com uma menor pressão de serviço, eram instalados em tubos rígidos e/ou flexíveis mais próximos da superfície do solo e usualmente acompanhados de válvulas reguladoras de pressão.

O princípio básico de funcionamento deste tipo de emissor é um jato de água na vertical proveniente do bocal que atinge uma placa defletora fixa que está disposta na horizontal, podendo esta placa ser de forma côncava, plana ou convexa, além de possuir superfícies com ou sem ranhuras, que permite a aplicação de forma pulverizada em forma de pequenas gotas. A forma e a superfície da placa defletora devem ser escolhidas de acordo com a necessidade de aplicação, variando o ângulo e o diâmetro molhado de acordo com a necessidade do irrigante.

Comercialmente, recomenda-se a utilização dos emissores de baixa pressão e com placas defletoras fixas em um espaçamento entre emissores de no máximo, três (3) metros, garantindo a sobreposição e a uniformidade de aplicação. A partir de alguns estudos foi possível reforçar essa recomendação do fabricante, como no caso do estudo de Kincaid et al. (1996), que analisaram a distribuição das gotas resultantes de uma aplicação com emissores de placa fixa e afirmaram que este tipo de emissor não consegue trabalhar com diâmetros molhados elevados e que sua performance permite apenas um pequeno raio de alcance. Tal análise foi confirmada anos depois por Faci et al. (2001), onde comprovaram que este tipo de emissor produz gotas de diâmetro que alcançam até

3mm, concentradas em um pequeno intervalo de diâmetros. Além disso, foi observado um comportamento de concentração de gotas a uma mesma distância do emissor, produzindo assim uma espécie de “coroa” circular molhada, aumentando a taxa de precipitação instantânea e proporcionando um diâmetro molhado reduzido.

A evolução da tecnologia de aplicação continuou acompanhando a expansão da área de agricultura irrigada e da adoção do sistema de irrigação por pivô central. Na década de 90, foram introduzidos no mercado os primeiros emissores com tecnologia rotativa de aplicação, que se diferenciavam dos emissores convencionais de placa defletora fixa por possuírem uma placa defletora com ranhuras curvas, que a partir do impacto do jato de água criava um “momentum” e garantia o movimento rotativo da placa defletora, fazendo com que cada ranhura produzisse um próprio jato de aplicação de água, com diâmetros distintos e mais elevados de gota, produzindo um padrão “cônico” de aplicação de água, permitindo um maior diâmetro molhado com uma menor taxa de precipitação instantânea.

Em um estudo recente de Jiao et al. (2017), foi analisado o comportamento característico de distribuição de água para dois distintos tipos de emissores para pivô central (RSPS – Rotating Spray Plate Sprinklers- Emissores de placa rotativa e FSPS – Fixed Spray Plate Sprinklers – Emissores de placa fixa), foram observados diferentes padrões de distribuição de água. Os emissores RSPS repetiram o padrão apresentado por Faci et al. (2001) e obtiveram um formato mais cônico, com um maior volume aplicado próximo ao eixo central do emissor, e à medida que se distanciava do eixo central o volume aplicado reduzia gradualmente, fornecendo um maior diâmetro molhado e uma menor taxa de precipitação instantânea. Para os emissores FSPS, os resultados também foram semelhantes aos de Faci et al. (2001), eles apresentaram uma distribuição denominada pelo autor de “formato de anel”, com uma concentração de água distribuída simetricamente em ambos os lados (periferia), e com um baixo volume aplicado próximo ao eixo central do emissor.

Os emissores de placa defletora rotativo ganharam um incremento no final da década de 90, quando os emissores da família I-wob Senninger® foram introduzidos no mercado, trazendo como principal diferença uma placa defletora com nove ranhuras e que tem seu comportamento rotativo oscilante assegurado pela rotação excêntrica ao redor do eixo central, garantindo uma rotação muito mais rápida, além de cada ranhura promover de forma contínua um jato de água com diferentes ângulos verticais, garantindo uma melhor distribuição de água. Atualmente, os emissores mais populares utilizados em pivô

central de baixa pressão são os emissores tipo spray de placa fixa (FSPS) e tipo spray de placa rotativa oscilante (RSPS), e suas diferenças podem ser observados na Figura 1.

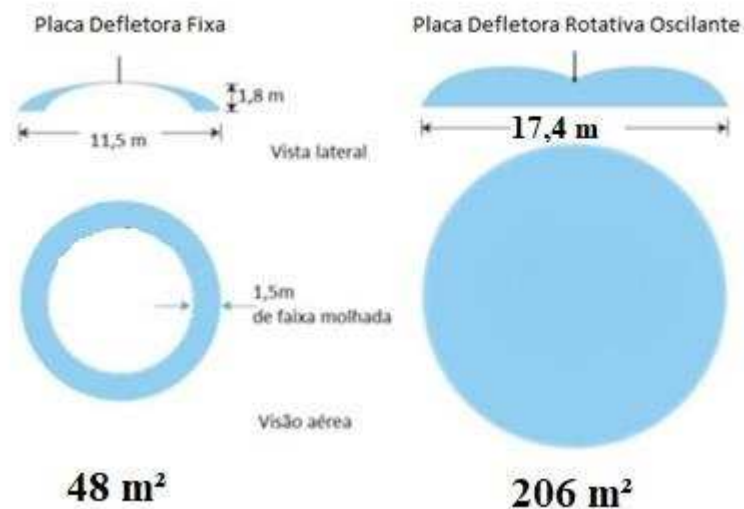


Figura 1- Característica de perfil de aplicação de emissores de placa defletora fixa e placa defletora rotativa oscilante. Nesse exemplo os emissores estão com uma mesma condição. Adaptado de catálogo Senninger <https://www.senninger.com/pt/product/i-wob-up3>

4. Material e Métodos

Este experimento foi elaborado para auxiliar na estimativa das perdas de água por evaporação e arraste pelo vento que ocorrem na irrigação por pivô central e modelagem das mesmas em condições de campo. As perdas foram determinadas pelo ensaio de precipitação usado nas avaliações de irrigação, seguindo a metodologia proposta por Merriam e Keller (1978), Merriam et al. (1980), Heermann (1990) e Keller e Bliesner (1990) Bernardo et al.(2006).

4.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Unidade de Ensino Pesquisa e Extensão – UEPE do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa – UFV, localizado no município de Coimbra-MG, nas coordenadas: Latitude $20^{\circ}49'51.18''$ Sul e longitude $42^{\circ}45'57.42''$ Oeste a uma altitude de 715 metros. Segundo a classificação de Köpen, o clima é do tipo Cwb, mesotérmico, com verões chuvosos e invernos frios e secos. A área experimental conta com um monitoramento climático de uma estação meteorológica Davis Vantage Pro II, que fica situada a 150 metros de distância do centro do pivô e que registrou as variáveis climáticas (temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento (ms^{-1}), velocidade máxima do vento (ms^{-1}), umidade relativa do ar(%), radiação solar (wm^{-2}) e precipitação (mm)) em intervalos de 10 em 10 minutos.

4.2. Descrição do sistema de irrigação

O equipamento de irrigação utilizado na condução do experimento foi um pivô central Asbrasil PA3 Light, com uma torre de comprimento igual a 57 metros e tubulação de aço galvanizado com diâmetro de 168,3 mm ($6\ 5/8''$) e um vão em balanço de 27 metros e tubulação de aço galvanizado com um diâmetro de 142 mm ($5\ 9/16''$), com um raio total de 84 metros cobrindo uma área de aproximadamente 2,22 hectares. O equipamento possui um moto redutor de 0,5cv instalado na torre, o que promove a movimentação do equipamento à uma velocidade de aproximadamente 112 m/h, sendo possível completar uma volta à 100% com 3,2 horas (3 horas e 12 minutos). O equipamento conta com 39 saídas, sendo as 3 primeiras fechadas para evitar uma alta taxa de precipitação instantânea próximo à base. Cada saída possui uma curva de plástico onde se encaixam tubos flexíveis que são ligados a válvulas reguladoras de pressão PSR2 Senninger® 69 kPa (10 PSI) e por final um emissor à uma altura de aproximadamente 2,00 m da superfície do solo.

Para o fornecimento de água, o sistema conta com uma bomba KSB 32-160 com uma rotação de 3500 RPM e um motor Elétrico WEG de 7,5 CV. A bomba se encontra instalada na casa de bomba (vide esquema) à uma altitude de 712m, enquanto o reservatório se encontra à uma altitude de 710m e à 3m de distância da entrada da bomba. A partir do sistema de bombeamento, uma linha de recalque de aço zincado com um comprimento de 120 metros sai em direção à base do pivô, de acordo com a figura 2.



Figura 2 - Área experimental e o Pivô central em estudo – Unidade de Ensino Pesquisa e Extensão da Universidade Federal de Viçosa – UFV – Coimbra, Minas Gerais.

4.3. Determinação das vazões dos emissores e lâmina média do pivô central

Visando identificar, mensurar e modelar as perdas por evaporação e arraste e suas respectivas uniformidades de distribuição em diferentes modelos de emissores e condições meteorológicas, foram elaboradas e testadas configurações de emissores (Figura 3) com placas defletoras fixas (Super Spray®) e placa defletora rotativa oscilante (Iwob®). Para se obter uma análise mais detalhada das vazões de cada emissor e conseqüentemente a lâmina real do equipamento, foi elaborada uma metodologia para medição de vazão em situações reais de campo. Para isto, um dispositivo foi criado para medições diretas em campo. Este dispositivo era composto de um balde de oito litros (8 L), acoplado com um adaptador ¾” no fundo para a conexão com um tubo flexível de 8 metros que descarregava a água coletada pelo balde em um outro balde graduado de dez litros (10L). Depois, com o auxílio de uma proveta graduada de 1000 cm³, era feita uma mensuração mais refinada. A partir deste dispositivo, foram realizadas 3 coletas de vazão de um minuto para cada emissor e, a partir dessas três coletas, calculada uma vazão média.



Figura 3 - Emissor de placa defletora fixa – Super Spray® (a esquerda), e emissor de placa defletora rotativa oscilante – Iwob® (a direita).

Três listagens considerando diferentes vazões por emissor foram apresentadas. A primeira listagem obtida com os valores de catálogo, considerando a pressão de saída do regulador de pressão igual a 69 kPa (10PSI) que foi denominada vazão de catálogo. A segunda listagem considerou valores de vazões considerando a curva de histerese do regulador de pressão, denominando – se vazão estimada. A terceira listagem foi elaborada considerando a vazão coletada em medições diretos a campo como foi descrito acima. Para efeito de cálculos de perda por evaporação e arraste, considerou-se a lâmina aplicada sendo calculada através das vazões coletadas em campo.

4.4. Ensaios de Precipitação

As lâminas de irrigação do ensaio foram coletadas em coletores Fabrimar® de diâmetro 80 mm, espaçados equidistantemente de 3 m a 0,80m de altura, formando 7 linhas com 84m de comprimento com 28 coletores cada, totalizando 196 coletores, cobrindo metade da área do pivô em estudo (Figura 4 e 5). Além das lâminas coletadas, as pressões de entrada e de saída da bomba foram monitoradas, assim como no último emissor, garantindo uma pressão de no mínimo 34 kPa acima da pressão nominal do regulador de pressão (69kPa) assegurando o desempenho dos emissores de acordo com o recomendado pelo fabricante. Uma estação meteorológica Davis® Advantage Pro Plus II foi instalada e configurada para realizar coletas dos dados em um intervalo de 10 minutos durante as avaliações. A velocidade de deslocamento do equipamento de irrigação foi verificada em todos os pontos onde as linhas com coletores foram dispostas. Para a verificação da velocidade, foram demarcados 3 intervalos de 10 metros na trilha do pivô central, e foram realizadas 3 medições de tempo de acordo com o deslocamento do equipamento, correlacionando tempo e distância percorrida, com isso obtendo uma velocidade de deslocamento.

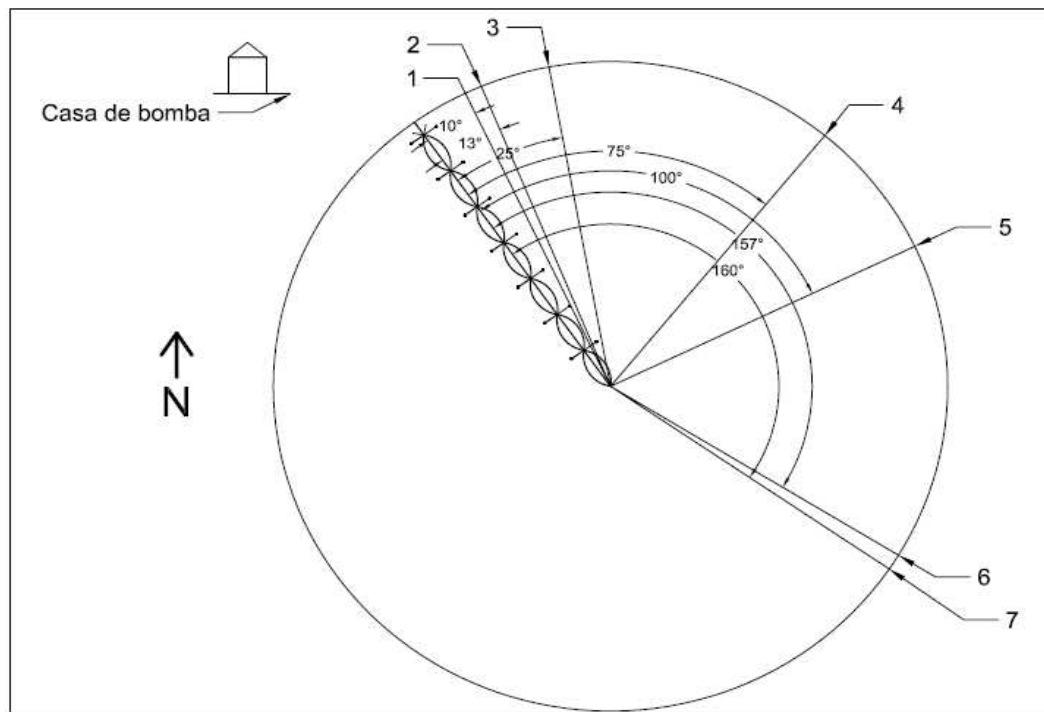


Figura 4 Croqui da área experimental com a disposição das linhas de coletores (1 – 7) com os respectivos ângulos.



Figura 5. Ensaio de precipitação a campo com emissores de placa defletora rotativa oscilante.

O volume de água coletado em cada coletor foi aferido com uma proveta de vidro graduada com precisão de 1 cm³ e uma capacidade total de 50 cm³, imediatamente após o término de aplicação em cada ponto, evitando problemas com perdas por evaporação. Logo após esses valores foram convertidos em lâmina d'água e utilizados no cálculo de lâmina média coletada.

4.5. Modelagem das Perdas por Evaporação e Arraste

As perdas por evaporação e arraste foram calculadas com a Equação 3.

$$PEA = 100 * \left\{ 1 - \left[\frac{L_{col}}{L_{aplic}} \right] \right\} \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

- PEA = Perdas por evaporação e arraste, %;
- L_{col} = Lâmina média coletada no ensaio de precipitação, mm; e
- L_{aplic} = Lâmina média aplicada pelo sistema, mm.

Para elaboração dos modelos foram coletados os seguintes dados climáticos: Temperatura (°C), umidade relativa (%), velocidade do vento (ms⁻¹), radiação (wm⁻²) e déficit de pressão de vapor (kPa). As vazões aplicadas pelos emissores foram aferidas a partir de medidas diretas em campo de acordo com o descrito acima. A pressão foi monitorada na saída da bomba e no último emissor com um manômetro, visando checar se a pressão de entrada nos emissores estava no mínimo 34 kPa acima da pressão nominal

de serviço do regulador de pressão, garantindo a vazão do emissor e o perfil de distribuição.

Para a elaboração das equações preditivas de perdas por evaporação e arraste em função das variáveis meteorológicas, ajustou-se modelos de regressão múltipla considerando as variáveis independentes: Temperatura °C, umidade relativa do ar %, velocidade do vento ms^{-1} , radiação wm^{-2} , déficit de pressão de vapor kPa, que foram registrados pela estação meteorológica em um intervalo de 10 minutos. Para identificação do modelo mais adequado considerou-se a significância dos coeficientes de regressão, ao nível de 5%, e a magnitude do coeficiente de determinação R^2 . Para verificar se os erros da regressão seguem uma distribuição normal foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk a 5%. O modelo que foi gerado pode ser descrito pela Equação 4.

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3 + (\dots) + nX_n \quad (\text{Equação 4})$$

em que:

Y	=	Variável dependente;
a, b, c, n	=	Coefficientes da regressão; e
X_1, X_2, X_3, X_n	=	Variáveis independentes.

Em cada caso, as variáveis independentes (X) foram consideradas nas seguintes formas matemáticas X, log (X), 1/X e \sqrt{X} . Além disso, foram testados modelos de regressão em conjunto com um diferente número de variáveis independentes criando uma população de equações preditivas. Foram desenvolvidos diferentes modelos de acordo com as placas defletoras, tais modelos foram classificados em grupos de acordo com as variáveis meteorológicas. Foi adotado um critério de simplicidade, conforme recomendado por Playán et al. (2005), onde equações envolvendo certo número de variáveis independentes só foram aceitas se o coeficiente de determinação fosse significativamente superior àquele encontrado para equações mais simples, com menor número de variáveis independentes.

4.6 Análise da Identidade de Modelos

Após a identificação de quais variáveis meteorológicas afetavam significativamente a PEA, efetuou-se a análise de identidade de modelos para comparar as equações ajustadas para cada tipo de emissor através do Software GENES® (CRUZ, 2013). Esta análise permite avaliar se uma única equação ajustada (modelo reduzido) é

suficiente para explicar o comportamento da PEA nos dois tipos de emissores, ou se são necessárias equações diferentes para cada emissor (modelo completo). A comparação entre modelos completo e reduzido seguiu a metodologia descrita por Regazzi e Silva (2010), adaptada para modelos lineares. Esta metodologia é baseada em teste da razão de verossimilhança, com aproximação pela estatística F.

4.7 Comparação com os Modelos Existentes

As perdas por evaporação e arraste e as variáveis meteorológicas, determinadas e medidas em campo, pelas avaliações do sistema, foram confrontadas com alguns modelos já existentes na literatura. Na Tabela 3 está apresentado um resumo das equações que foram testadas.

Tabela 3 – Modelos empíricos descritos na literatura para estimativa das perdas por evaporação e arraste

Referência	Equação empírica
Dechimi et al. (2003)	PEA = 7,479+5,287V _v
Playán et al. (2004)	PEA = 1,55+1,13V _v
Playán et al. (2005)	PEA = -2,1+1,91V _v +0,231T
Playán et al. (2005)	PEA = 2,7 + 2,31*V _v
Ortíz et al. (2009)	PEA =3,92+2,51V _v
Yacoubi et al. (2010)	PEA = 24,91 + 3,70*V _v -0,28UR
Sanchez et al. (2011)	PEA= -2,835*V _v + 0,433*T
Ortiz et al. (2015)	PEA = 9,41 + 6,53*V _v
Colombo et al. (2015)	PEA = 0,2284 + 2,821*V _v

Para a comparação dos dados observados em campo com os modelos empíricos citados na literatura, foi aplicado o índice de confiança de desempenho (c) (Equação 8) de Camargo & Sentelhas (1997), que foi obtido pela multiplicação do coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equações 5 e 6) pelo índice de Willmott (d) (Equação 7), conforme apresentado nas equações abaixo:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{oi} * Y_{ei})^2}{\sum_{i=1}^N Y_{o^2} * \sum_{i=1}^N Y_{ei}} \quad (\text{Equação 5})$$

$$r = \sqrt{r^2} \quad (\text{Equação 6})$$

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ei} - Y_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_{ei} - \bar{Y}_o| + |Y_{oi} - \bar{Y}_o|)^2} \right\} \quad (\text{Equação 7})$$

$$c = r * d \quad (\text{Equação 8})$$

r = Coeficiente de correlação de Pearson

d = Índice de Willmott

c = índice de Confiança de Desempenho de Camargo & Sentelhas (1997)

Onde:

Y_{ei} é o i -ésimo valor previsto ou estimado;

Y_{oi} é o i -ésimo valor observado;

\bar{Y}_o é a média dos valores observados.

O índice de confiança de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997) é classificado de acordo com os intervalos: $c > 0,85$ ótimo; 0,76 a 0,85 muito bom; 0,66 a 0,75 bom; 0,61 a 0,65 bom; 0,51 a 0,60 sofrível; 0,41 a 0,50 mau e $c < 40$ péssimo.

4.8 Análise da Uniformidade de Distribuição

A uniformidade de distribuição de água do ensaio de precipitação foi analisada segundo o coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942) modificado por Heermann e Hein (1968) (Equação 9).

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n a_i \times |x_i - \bar{x}|}{\sum_{i=1}^n a_i \times x_i} * 100 \quad (\text{Equação 9})$$

A lâmina média coletada é dada por:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i * X_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (\text{Equação 10})$$

em que:

CUC = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen modificado por Heermann e Hein, %

a_i = Área representativa do coletor de ordem i , mm;

x_i = Lâmina coletada no coletor de ordem i , mm;

\bar{x}_i = Lâmina média coletada, mm; e

n = Número total de coletores, adimensional.

5. Resultados e Discussão

5.1. Vazões coletadas e lâmina média coletada

Após a comparação das listagens mencionadas nas Tabelas 4 e 5, observa-se uma diferença nas vazões em ambos os emissores e, conseqüentemente na lâmina aplicada.

Tabela 4. Listagem para os emissores de placa defletora rotativa oscilante, considerando a vazão de catálogo, a vazão estimada e a vazão coletada

Listagem Emissores de Placa Rotativa Oscilante						
Saída	Posição do Emissor	Distância do centro do Pivô central (m)	Número do Bocal	Vazões Litros / hora		
				Catálogo	Estimado	Coletado
1	-	3,20	-	-	-	-
2	-	5,30	-	-	-	-
3	-	7,50	-	-	-	-
4	1	9,62	6	182	190	189,4
5	2	11,64	6	182	190	189,4
6	3	13,89	6	182	190	189,4
7	4	16,09	6	182	190	189,4
8	5	18,14	6	182	190	189,4
9	6	20,19	6,5	213	230	233,2
10	7	22,41	7	248	260	269,2
11	8	24,51	7	248	260	269,2
12	9	26,66	7,5	286	300	315
13	10	28,71	8	325	350	366
14	11	30,91	8	325	350	366
15	12	32,96	8,5	368	390	403,2
16	13	35,16	8,5	368	390	403,2
17	14	37,21	9	411	440	461,4
18	15	39,41	9	411	440	461,4
19	16	41,46	9,5	459	490	524
20	17	43,71	9,5	459	490	524
21	18	45,81	10	509	540	544,5
22	19	48,01	10	509	540	544,5
23	20	50,11	10,5	561	600	619,2
24	21	52,21	10,5	561	600	619,2
25	22	54,34	11	618	660	692,1
26	23	56,88	11	618	660	692,1
27	24	58,58	12	736	780	808,2
28	25	60,78	12	736	780	808,2
29	26	62,8	11,5	675	720	757,2
30	27	64,99	12	736	780	808,2
31	28	67,01	12	736	780	808,2
32	29	69,14	12,5	799	850	895,5
33	30	71,24	12,5	799	850	895,5
34	31	73,34	12,5	799	850	895,5
35	32	75,47	13	865	920	954
36	33	77,53	13	865	920	954
37	34	79,62	13	865	920	954
38	35	82,42	13,5	933	990	1113
39	36	83,94	13,5	933	990	1113
Vazão Total				18884	20070	21018,9

Tabela 5. Listagem para os emissores de placa defletora fixa, considerando a vazão de catálogo, a vazão estimada e a vazão coletada.

Listagem Emissores de Placa Fixa						
Saída	Posição do Emissor	Distância do centro do Pivô central (m)	Número do Bocal	Vazões Litros / hora		
				Catálogo	Estimado	Coletado
1	-	3,20	-	-	-	-
2	-	5,30	-	-	-	-
3	1	7,50	4	79	90	83,8
4	2	9,62	4,5	102	110	101,4
5	3	11,64	5	125	130	135,4
6	4	13,89	5,5	152	160	157,4
7	5	16,09	5,5	152	160	157,4
8	6	18,14	6	182	190	189,4
9	7	20,19	6,5	213	230	233,2
10	8	22,41	7	248	260	269,2
11	9	24,51	7	248	260	269,2
12	10	26,66	7,5	286	300	315
13	11	28,71	8	325	350	366
14	12	30,91	8	325	350	366
15	13	32,96	8,5	368	390	403,2
16	14	35,16	8,5	368	390	403,2
17	15	37,21	9	411	440	461,4
18	16	39,41	9	411	440	461,4
19	17	41,46	9,5	459	490	524
20	18	43,71	9,5	459	490	524
21	19	45,81	10	509	540	544,5
22	20	48,01	10	509	540	544,5
23	21	50,11	10,5	561	600	619,2
24	22	52,21	10,5	561	600	619,2
25	23	54,34	11	618	660	692,1
26	24	56,88	11	618	660	692,1
27	25	58,58	12	736	780	808,2
28	26	60,78	12	736	780	808,2
29	27	62,8	11,5	675	720	757,2
30	28	64,99	12	736	780	808,2
31	29	67,01	12	736	780	808,2
32	30	69,14	12,5	799	850	895,5
33	31	71,24	12,5	799	850	895,5
34	32	73,34	12,5	799	850	895,5
35	33	75,47	13	865	920	954
36	34	77,53	13	865	920	954
37	35	79,62	13	865	920	954
38	36	82,42	13,5	933	990	1113
39	37	83,94	13,5	933	990	1113
Vazão Total				18766	19960	20896,7

Para ambos os emissores, a lâmina variou em aproximadamente 6% quando comparada a lâmina estimada com a lâmina de catálogo, e aproximadamente 11% comparando a lâmina coletada com a de catálogo (Tabela 6). Porém, a comparação mais significativa é entre a lâmina coletada e a lâmina estimada, tendo em vista que para a

elaboração de cartas de aspersão, as empresas consideram a curva de histerese dos reguladores. Nesses casos, comparando as lâminas coletadas em campo com as lâminas estimadas, foi obtido uma diferença de aproximadamente 4,0 % em ambos os casos.

Tabela 6. Valores de lâmina média aplicada para ambos os emissores.

Emissor	Lâmina Catálogo mm	Lâmina Estimada mm	Lâmina Coletada mm
Rotativa oscilante	2,70	2,87	3,00
Fixa	2,68	2,85	2,98

Essa diferença poderia ter sido minimizada se fossem utilizados diferentes reguladores de pressão, reguladores mais específicos para menores vazões (PRL – “Pressure Regulator Low Flow” 114 a 1817 litros/hora). Além disso, destaca-se que o sistema de irrigação utilizado para o experimento é de pequeno porte (2,2 hectares) comparado com os pivôs convencionais (aproximadamente 60 hectares), o que pode ter evidenciado a diferença de vazão entre as listagens. Esta metodologia de medição direta não é operacionalmente viável para pivôs de tamanho convencional, recomenda-se uma aferição da pressão do sistema e uma estimativa das perdas de carga ao longo do mesmo, e a partir daí elaborar uma listagem de aspersão de acordo com a curva de histerese fornecida pelo fabricante, além de utilizar diferentes reguladores de pressão de acordo com as vazões demandadas em cada ponto do equipamento.

5.2. Desempenho dos Emissores

5.2.1. Emissores com Placa Defletora Rotativa Oscilante

Para análise das perdas por evaporação e arraste, foram realizados 134 testes em campo com os emissores de placa defletora rotativa oscilante. Os testes foram realizados durante o período de 18 de agosto até 27 de setembro de 2017, em diferentes horários variando das 07:00 h até as 23:00h. Durante os testes, as variáveis meteorológicas foram registradas em intervalos de 10 minutos. Para variável velocidade do vento, foram observados valores médios entre 0m/s até 3,60 m/s com uma média de 1,42 m/s. Os valores médios observados e os seus respectivos desvios, referente às variáveis climáticas se encontram detalhados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resumo dos valores médios e seus respectivos desvios e erro padrão, para emissores com placa defletora rotativa

Variável	Amostras	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão
PEA (%)	134	10,7	0,0584	0,00505
Lâm. Média Coletada (mm)	134	2,64	0,178	0,0139
Temperatura (°C)	134	22,96	3,612	0,312
Umidade Relativa (%)	134	59,65	12,521	1,082
Velocidade do Vento (m/s)	134	1,416	0,995	0,0860
Radiação (w/m ²)	134	304,832	284,985	24,619
Déficit. Pressão (kPa)	134	1,237	0,610	0,0527

Outro indicativo pertinente é a interpretação dos dados de acordo com os intervalos e a amplitude que eles estão inseridos, favorecendo uma interpretação mais refinada dos fatos. Na Tabela 8 são apresentados os intervalos dos dados, com seus valores médios nos dois quartis extremos (25% menores e 25% maiores) além dos dados médios referentes aos 50% dos dados que se encontram nos dois quartis centrais.

Tabela 8 - Amplitude dos dados observados e suas respectivas médias separadas em quartis, para emissores de placa defletora rotativa oscilante.

Variável	Amplitude	Máximo	Mínimo	Médio	25 %	75 %
PEA (%)	24,4	24,5	0,1	9,95	6,21	14,9
Lâm. Média Col. (mm)	0,753	2,99	2,23	2,65	2,51	2,78
Temperatura (°C)	14,5	30,0	15,85	23,40	19,75	25,65
Umidade Relativa (%)	40	79,0	39,0	61,25	48	70,5
Velocidade vento (ms ⁻¹)	3,6	3,60	0	1,55	0,40	2,20
Radiação (wm ⁻²)	885,33	885,33	0	262,0	3,50	554
Déficit de Pressão (kPa)	2,172	2,564	0,392	1,095	0,691	1,713

De acordo com os dados coletados foi possível analisar e comparar as diferentes lâminas médias coletadas para a condição climática do momento (Figura 6). Observou-se que as irrigações noturnas apresentaram maiores lâminas coletadas, variando de 2,72mm até 3,00 mm e uma lâmina média de 2,80 mm, conseqüentemente menores valores de PEA foram observados, com valores em um intervalo de 0% até 9% e uma perda média de aproximadamente 4%.

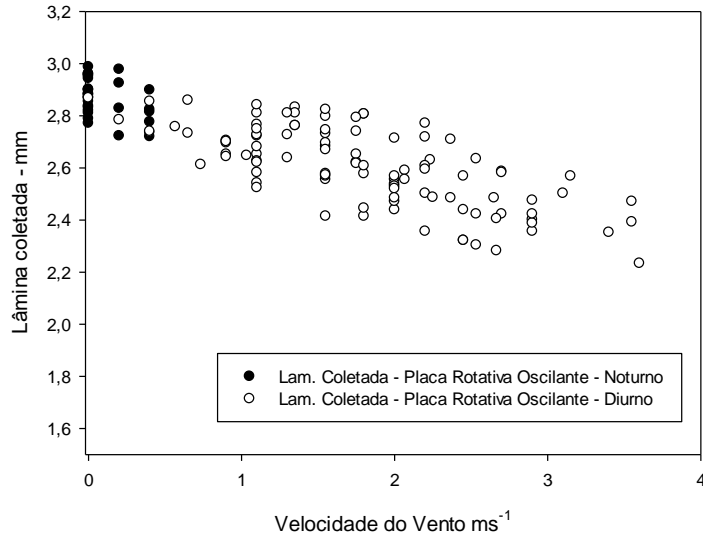


Figura 6 – Comparativo das lâminas médias coletadas (mm) em testes realizados em horários distintos e de acordo com as respectivas velocidades do vento ms^{-1} – Emissores Placa rotativo oscilante.

Em contrapartida, nos eventos de irrigação durante o dia foram obtidas lâminas menores variando de 2,23 mm até 2,87mm e uma lâmina média de 2,60 mm, acarretando em valores mais elevados de PEA, que variaram de 3,5% até 24,5% com valores médios de 12,6 % (Figura 7).

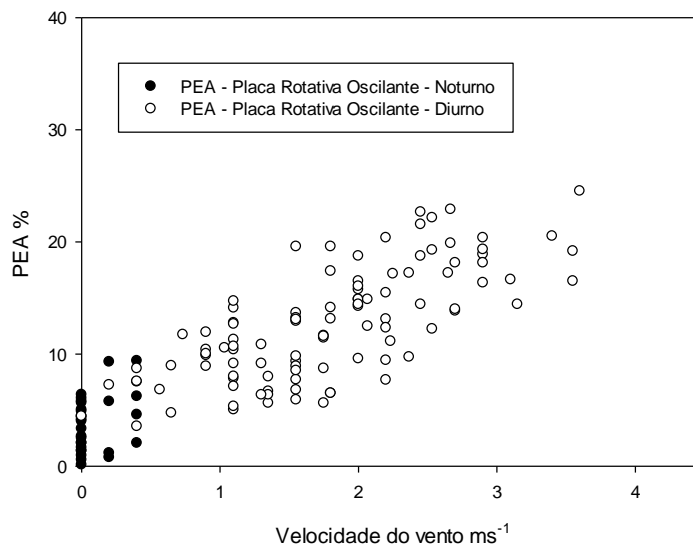


Figura 7– Comparativos dos valores calculados de PEA em horários distintos e de acordo com as respectivas velocidades do vento em ms^{-1} . – Emissores placa rotativa oscilante.

Os resultados de eficiência de aplicação para os emissores de placa defletora rotativa oscilante seguiram a mesma tendência observada no trabalho de Playán et al. (2005), onde foi utilizado uma máquina experimental de irrigação criada por Playán et al.

(2004) simulando um sistema mecanizado de irrigação lateral móvel, com emissores de placa rotativa oscilante instalados a 2,05m de altura em relação ao solo, onde foram obtidos valores de perdas em torno de 5% para irrigações noturnas e 9,8% para irrigações durante o dia. . Na tabela 9 encontra-se um resumo sobre os valores médios das lâminas coletadas e suas respectivas perdas por evaporação e arraste e as velocidades do vento médias ms^{-1} para cada horário de irrigação.

Tabela 9. Resumo da lâmina média coletada, PEA %, e as respectivas velocidades do vento média em ms^{-1} , para os emissores rotativos oscilantes, de acordo com o horário de aplicação.

Horário de irrigação	Lâmina Média Coletada – mm	PEA média %	Velocidade do Vento média ms^{-1}
Noite	2,8	4	0,9
Dia	2,6	12,6	1,79
Dia e Noite	2,66	10,7	1,42

Para a análise da eficiência de distribuição - Ed, foram realizados 134 testes em campo, em diferentes horários e condições meteorológicas. Tal eficiência foi calculada a partir do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (1942) modificado por Heermann e Hein (1968), representado em porcentagem. O emissor de placa defletora rotativa oscilante obteve resultados satisfatórios e consistentes, independentemente das condições meteorológicas do horário de aplicação, com valores médios acima de 92%. Observa-se na Figura 8 que a uniformidade de distribuição se manteve em termos gerais, bem consistente e em elevados níveis, independentemente da condição meteorológica e ou horário de aplicação.

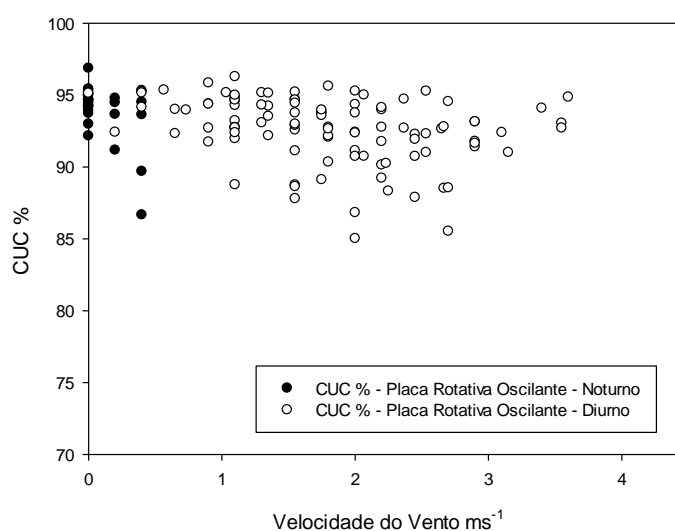


Figura 8. Valores obtidos de CUC% em horários distintos e de acordo com as respectivas velocidades do vento em ms^{-1} . – Emissores placa rotativa oscilante.

Em valores médios, o CUC% referente à aplicação noturna foi de 94% e para aplicações durante o dia de 92,6 % (Tabela 10). Os valores encontrados se concentraram entre 85% até 97%, tendo apenas 15 eventos em um total de 134 com coeficiente de uniformidade abaixo de 90%, com valores médios de 87,95% o que representou aproximadamente 11% dos testes realizados em campo. Em contrapartida, os outros 119 testes obtiveram resultados superiores a 90% com uma média de 93,5%, representando 89% dos testes.

Tabela 10 – Resumo do CUC% médio e as respectivas velocidades do vento média em ms^{-1} para os emissores de placa rotativa oscilante de acordo com o horário de aplicação.

Horário de irrigação	CUC% médio	Velocidade do Vento média m/s
Noite	94	0,9
Dia	92,6	1,79
Dia e Noite	92,8	1,42

Considerando os resultados estratificados em quartis (Tabela 12), observa-se que os 25% menores valores de CUC% ficaram em torno de 91,3% e os 25% maiores em 94,7%. Além dos quartis médios que obtiveram um valor médio de 93,2%.

Tabela 11 – Valores médios de CUC%, e seu comportamento estratificado em quartis.

Variável	Média	Máximo	Mínimo	25%	50%	75%
CUC%	92,8	97	85	91,3	93,2	94,7

5.2.2. Emissores com Placa Defletora Fixa

Considerando os emissores de placa defletora fixa, foram realizados 94 testes em campo durante o período de 19/07 até 27/09/2017 em distintos horários e condições climáticas (7:00 h às 23h). Para a variável velocidade do vento obteve-se valores médios em intervalos de 10 minutos variando de 0 ms^{-1} até $4,05 \text{ ms}^{-1}$ com os respectivos valores médios de PEA de aproximadamente 14,7%. As médias e os intervalos para as demais variáveis se encontram na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores médios, desvios e erro padrão para emissores de placa defletora fixa.

Variável	Amostra	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão
PEA (%)	94	14,7	0,0838	0,0172
Lâmina Coletada (mm)	94	2,54	0,249	0,0257
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	94	22,55	3,712	0,383
Umidade Relativa (%)	94	59,67	13,53	1,377
Velocidade vento (ms^{-1})	94	1,738	1,103	0,114
Radiação (wm^{-2})	94	390,372	310,550	32,031
Déficit de Pressão (kPa)	94	1,199	0,577	0,0595

A partir da análise das médias e dos intervalos dos dados obtidos nos emissores de placa fixa, observa-se um desempenho inferior quando comparado aos emissores de placa rotativa oscilante. Foram obtidos valores mais elevados de PEA e conseqüentemente menores lâminas coletadas. De acordo com o descrito na tabela 14, as PEA variaram de 1,3 % até 35,7 %, com valores médios de 8,75 % de PEA no quartil dos 25% menores e 21,5% no quadrante dos 25% maiores, obtendo um valor médio de 14% considerando os dois quartis centrais (Tabela 13).

Tabela 13- Amplitude dos dados observados e suas respectivas médias estratificadas em quartis para emissores de placa defletora Fixa

Variável	Amplitude	Máx.	Mín	Central	<25 %	>75 %
PEA (%)	34,4	35,7	1,3	14	8,75	21,5
Lâmina Coletada (mm)	1,03	2,95	1,92	2,57	2,35	2,7
Temperatura (°C)	13,6	27,6	14	23,1	20,3	25,5
Umidade Relativa (%)	47	84,5	37,5	59,75	46	71,5
Vel. vento (ms ⁻¹)	4,05	4,05	0	1,80	0,9	2,45
Radiação (wm ⁻²)	958,50	958,50	0	412	0	685,5
Déficit de Pressão (kPa)	2.05	2,31	0,25	1,10	0,68	1,72

De acordo com os dados apresentados na Tabela 14, observa-se a diferença entre as lâminas médias coletadas de acordo com o horário da irrigação e sua respectiva velocidade do vento ms⁻¹. Observou-se que as irrigações noturnas apresentaram maiores lâminas coletadas com um valor médio de 2,74 mm e uma PEA de 7,94%. Em contrapartida, os eventos de irrigação durante o dia foram obtidos lâminas menores com um valor médio de 2,46mm e uma PEA de 17,46%.

Tabela 14. Resumo da lâmina média coletada, PEA %, e as respectivas velocidades do vento média em m/s para os emissores de placa fixa de acordo com o horário de aplicação

Horário de irrigação	Lâmina Média Coletada – mm	PEA % Média	Velocidade do Vento média ms ⁻¹
Noite	2,74	7,94	0,65
Dia	2,46	17,46	2,18
Dia e Noite	2,54	14,73	1,73

As lâminas coletadas tiveram uma amplitude significativa e uma influência direta da variável velocidade do vento (Figura 9).

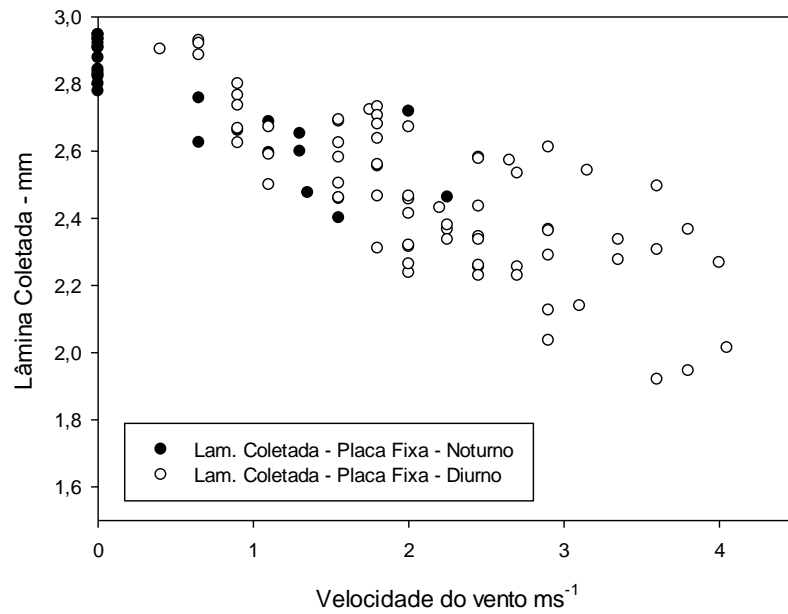


Figura 9 - Gráfico comparativo das lâminas médias coletada (mm) em testes realizados em horários distintos e de acordo com as respectivas velocidades do vento m/s – Emissores Placa Fixa.

As perdas por evaporação e arraste acompanharam esse comportamento observado nas lâminas coletadas (Figura 10), indicando uma forte influência da velocidade do vento como principal fator na determinação das perdas.

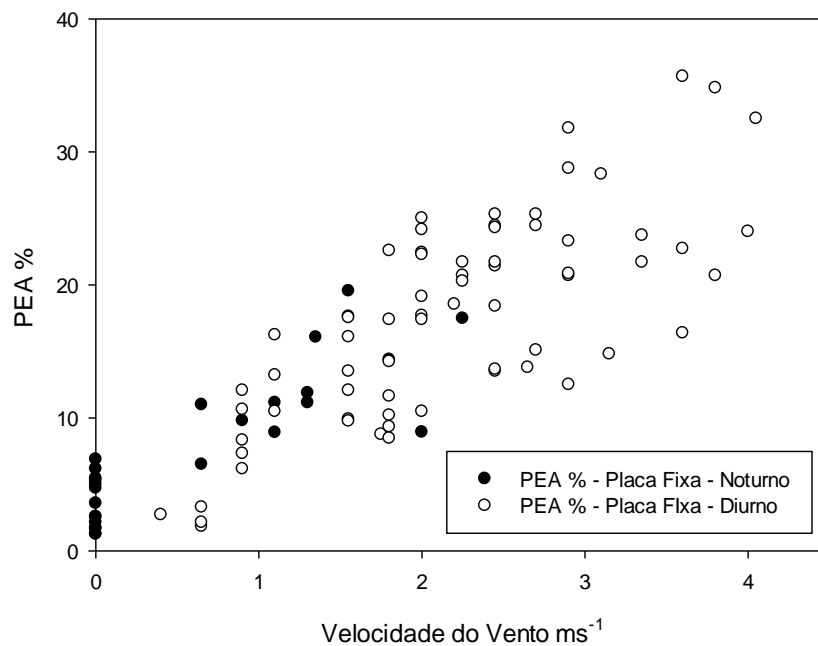


Figura 10 - Gráfico comparativos dos valores calculados de PEA em horários distintos e de acordo com as respectivas velocidades do vento em ms^{-1} e emissores placa fixa.

Como pode ser observado nas tabelas e discussões anteriores, os emissores de placa defletora fixa apresentam uma tendência a ter um desempenho inferior quando comparado com os emissores de placa defletora rotativa oscilante se tratando de perdas por evaporação e arraste, a mesma tendência se repete quando analisamos a uniformidade de distribuição. Para os emissores de placa fixa foram realizados 94 ensaios de precipitação, e após a coleta das lâminas o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen – CUC, foi calculado. Observa-se na Figura 11 que a uniformidade de distribuição não sofreu tanta influência das variáveis meteorológicas quanto as perdas por evaporação e arraste, a maioria dos valores encontrados se concentraram em uma faixa entre 85 – 90% de CUC.

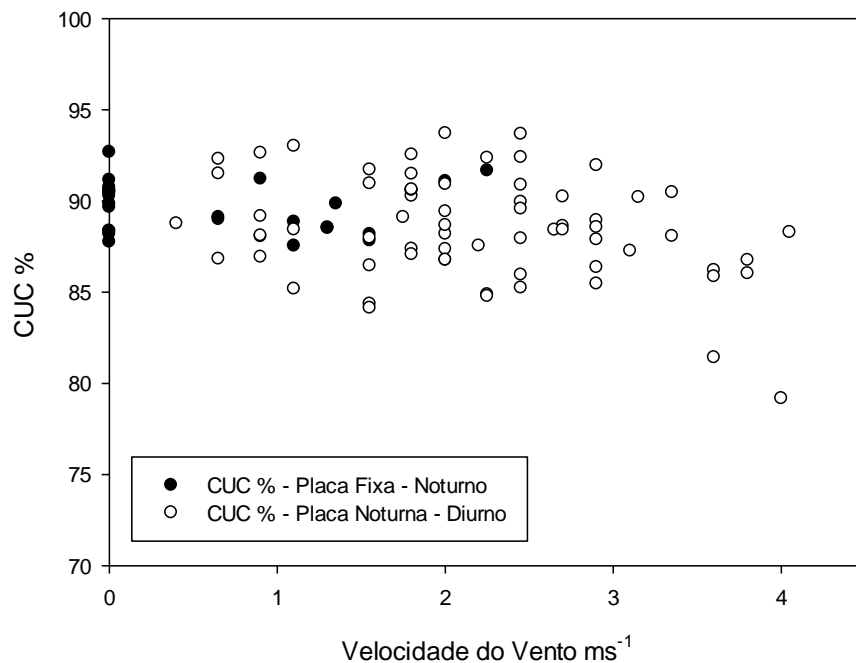


Figura 11 - Gráfico comparativo dos valores obtidos de CUC em horários distintos e de acordo com as respectivas velocidades do vento em ms^{-1} em emissores placa fixa.

No total de 94 medições em campo, 61 observações variaram de 79 % até 90% de CUC com uma média de 87,4%, representando 65% das observações. As outras 33 observações obtiveram valores entre 90 e 94,2 % com uma média de 91,4%. A partir de uma análise estratificada em quartis, podemos notar que os 25% maiores valores de CUC% tiveram uma média de 91,4%, enquanto os 25% menores se concentraram em um valor médio de 88,6% e para os dois quartis centrais foi obtido um valor de 89,9%.

5.3. Comparativo da uniformidade de distribuição entre os dois tipos de emissores.

Observa-se que os valores de uniformidade de distribuição se mantiveram concentradas em uma faixa de menor amplitude quando comparado com as PEA. A variável uniformidade de distribuição não sofreu tanta influência da variável independente velocidade do vento quanto à variável PEA. O que nos mostra que a uniformidade do sistema está mais relacionada às variáveis intrínsecas ao próprio sistema de irrigação (altura do emissor, pressão de serviço, tecnologia de aplicação, dimensionamento da carta de aspersão) do que propriamente as variáveis climáticas (velocidade do vento).

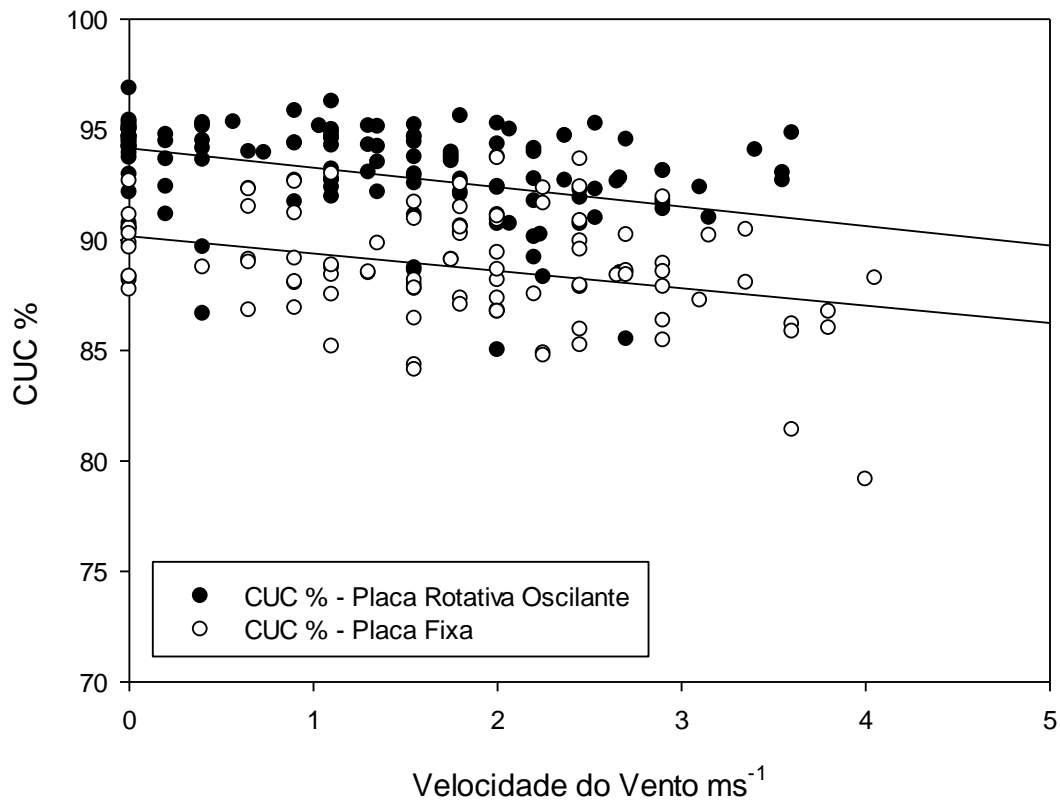


Figura 12 - Gráfico comparativo dos valores obtidos de CUC% em ambos os emissores de acordo com as respectivas velocidades do vento em ms⁻¹.

Destaca-se que os resultados obtidos em campo podem ser correlacionados com os estudos publicados por Faci et al.(2001) e Jiao et al. (2017), que descrevem o comportamento característico de distribuição de água dos emissores deste estudo, e concluem que os emissores de placa fixa são mais sensíveis às perdas em uniformidade

de distribuição. Isso é devido a sua distribuição periférica, com volumes de água mais concentrados a uma mesma distância do emissor, criando um formato de “coroa” circular molhada, aumentando a taxa de precipitação instantânea e produzindo um diâmetro molhado reduzido. Além dessa característica, os emissores de placa fixa produzem gotas de diâmetros mais reduzidos, o que influencia diretamente tanto na uniformidade de distribuição quanto nas perdas por evaporação e arraste.

De acordo com a classificação dos valores de CUC% definida pela ABNT NBR 14244 (ABNT, 1998) (Tabela 15), os valores observados de CUC% foram satisfatórios para ambos os emissores, com a grande maioria dos valores concentrados acima dos 85%.

Tabela 15. Classificação CUC % ABNT NBR 14.244

CUC %	Classificação
<80%	Ruim
80 – 84%	Regular
85 – 89%	Boa
>90%	Muito Boa

Os emissores de placa defletora rotativa oscilante se mostraram com uniformidades acima de 90% na grande maioria dos ensaios de precipitação, além disso alcançou um valor máximo de 97% em um dos eventos de irrigação noturna com condições excelentes para irrigação (velocidade do vento próxima de 0ms^{-1} , temperatura amena, umidade relativa elevada). De acordo com os valores descritos na tabela 16, os emissores de placa defletora fixa obtiveram um desempenho competitivo em condições de clima satisfatório (velocidade do vento $< 1,20\text{ms}^{-1}$), porém se concentraram em uma faixa abaixo dos emissores de placa rotativa oscilante (3 – 4%), e apresentaram alguns resultados insatisfatórios com situações de velocidade do vento acima de $3,5\text{ms}^{-1}$.

Tabela 16. Resumo dos valores de CUC% estratificados em quartis para ambos os emissores.

Emissor	Amplitude	Máximo	Mínimo	central	<25%	>75%
Placa Defletora Fixa	15,2	94,2	79,1	89,9	88,6	91,4
Placa Defletora Rotativa Oscilante	12	97	85	93,2	91,3	94,7

5.4. Modelagem das Perdas por Evaporação e Arraste – Emissores de Placa Defletora Rotativa Oscilante.

Para a elaboração das equações preditivas de perdas por evaporação e arraste em emissores de placa defletora rotativa oscilante, foi necessário a simulação de diversos modelos de regressão linear simples e/ou múltipla, onde foram analisados os coeficientes

de determinação R^2 , juntamente com a significância da variável independente. Para efeito de simulação e ajustes das equações preditivas, consideramos as variáveis climáticas citadas na Tabela 17, que foram monitoradas durante os 134 testes em campo.

Tabela 17. Variáveis climáticas utilizadas para geração dos modelos empíricos para ambos os emissores.

Variável	Símbolo
Temperatura °C	A
Umidade Relativa %	B
Velocidade do Vento ms^{-1}	C
Radiação wm^{-2}	D
Déficit de Pressão de vapor kPa	E

A partir dos ensaios de precipitação e os dados meteorológicos que foram monitorados, foi possível simular cinco distintos modelos, desde o mais simples considerando apenas a variável independente velocidade do vento até um mais complexo considerando cinco variáveis independentes e um nível de significância $\alpha=0,05$ (Tabela 18). A descrição dos modelos e as hipóteses testadas se encontram detalhadas a seguir.

$H_0 = \beta_0 = \beta_1$ - A variável independente não exerce influência na variável dependente, segundo o modelo proposto.

$H_1 = \beta_0 \neq \beta_1 \neq \beta_2 \dots \neq \beta_n$ - A variável independente exerce influência na variável dependente, segundo o modelo proposto.

Tabela 18. Valores de R^2 e variáveis climáticas utilizadas para cada modelo gerado para emissores de placa defletora rotativa oscilante.

Modelo	Variáveis	R^2	R^2 ajustado	A	B	C	D	E
01	1	0,702	0,700			*		
02	2	0,708	0,703	*		*		
03	3	0,709	0,702	*	*	*		
04	4	0,709	0,700	*	*	*	*	
05	5	0,709	0,698	*	*	*	*	*

Para o modelo 01 foi considerado apenas a variável independente velocidade do vento, onde ambos os β se mostraram significativos (Tabela 19). Tendo em vista um $t_{\text{tab}} = 3,29$ que é menor que o t calculado para β_0 e β_1 rejeitando a hipótese 0. Além disso, para reforçar essa afirmação a análise dos valores de p -valor são menores que o $\alpha 0,05$, confirmando que a variável independente (velocidade do vento) exerce influência na variável dependente (PEA). Esse modelo obteve um valor do coeficiente de determinação

$R^2 = 0,70$ fornecendo informação de quão adequado é o modelo para descrever esse fenômeno.

Tabela 19. Tabela referente ao modelo 01, com os valores de β_0 e β , além dos valores de erro padrão, teste t e p-valor.

Modelo 01 R² 0,702				
Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	0,0375	0,00482	7,766	<0,001
Velocidade do Vento	0,0492	0,00279	17,634	<0,001

A partir da análise de variância – ANOVA do modelo 01 (Tabela 20), observa-se o valor de F calculado maior que o F tabelado ($F_{\text{calc.}} 310,96 > F_{\text{tab.}} 3,84$) confirmando a rejeição da hipótese H_0 a um nível de significância $\alpha=0,05$, indicando que a variável independente (velocidade do vento) exerce influência na variável dependente (PEA) segundo o modelo proposto. Para identificar se os valores observados seguem uma distribuição normal foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk, onde obteve-se $P_{\text{calc.}} 0,125 < P_{\text{tab.}} 0,947$, indicando que os dados seguem uma distribuição normal.

Tabela 20. Análise de variância para o modelo 01 para emissores de placa defletora rotativo oscilante.

	Graus Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Regressão	1	0,319	0,319	310,960	<0,001
Resíduo	132	0,135	0,00103		
Total	133	0,454	0,00341		

O modelo 01 para emissores de placa defletora rotativa oscilante é uma regressão linear simples (Equação 12) composto por apenas uma variável independente (velocidade do vento) em relação à variável dependente (PEA) para emissores de placa defletora rotativa oscilante.

Modelo 01- Placa defletora rotativa oscilante:

$$PEA = 100 * (0.0375 + (0.0492 * V_v)) \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

PEA = Perdas por Evaporação e Arraste, %

V_v = Velocidade do Vento, ms^{-1}

Nos demais modelos (Tabelas 21, 22, 23, 24) foram considerados até 5 variáveis independentes (velocidade do vento, temperatura, umidade relativa, radiação e déficit de pressão). Em todos os casos simulados, somente a variável independente velocidade do vento se mostrou estatisticamente significativa com valores de $t_{\text{calc.}} > t_{\text{tab.}}$ e valores de p-

valor $< \alpha 0,05$, rejeitando assim a hipótese 0 e comprovando que essa variável independente (velocidade do vento) exerce uma influência na variável dependente (PEA). Apesar dos demais modelos apresentarem um R^2 um pouco mais elevado, as demais variáveis independentes não se mostraram estatisticamente significativas, como observado nas Tabelas 20 a 23. Além disso, foi adotado um critério de simplicidade, conforme recomendado por Playán et al. (2005), onde equações envolvendo certo número de variáveis independentes só serão aceitas se o coeficiente de determinação for significativamente superior àquele encontrado para equações mais simples, com menor número de variáveis independentes, levando em consideração a significância das variáveis independentes.

Tabela 21 – Modelo 02 com os valores das variáveis independentes e seus respectivos valores de erro padrão, teste t e p-valor.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	T	P
Constante	0,00940	0,0183	0,513	0,609
Temperatura	0,00136	0,000856	1,586	0,115
Velocidade do Vento	0,0470	0,00311	15,128	<0,001

Tabela 22 – Modelo 03 com os valores das variáveis independentes e seus respectivos valores de erro padrão, teste t e p-valor.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	T	P
Constante	-0,0553	0,0818	-0,676	0,500
Temperatura	0,00297	0,00216	1,373	0,172
Umidade Relativa	0,000479	0,000590	0,812	0,418
Velocidade do Vento	0,0463	0,00321	14,442	<0,001

Tabela 23 – Modelo 04, com os valores das variáveis independentes e seus respectivos valores de erro padrão, teste t e p-valor.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	-0,0615	0,0842	-0,729	0,467
Temperatura	0,00316	0,00225	1,405	0,162
Umidade Relativa	0,000514	0,000602	0,854	0,395
Velocidade do Vento	0,0471	0,00389	12,098	<0,001
Radiação	-0,00000453	0,0000140	-0,324	0,746

Tabela 24 – Modelo 05, com os valores das variáveis independentes e seus respectivos valores de erro padrão, teste t e p-valor.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	-0,0639	0,0952	-0,671	0,503
Temperatura	0,00304	0,00314	0,969	0,334
Umidade Relativa	0,000564	0,00109	0,515	0,607
Velocidade do Vento	0,0471	0,00398	11,835	<0,001
Radiação	-0,00000451	0,0000140	-0,322	0,748
Déf. de Pressão	0,00171	0,0308	0,0554	0,956

5.5. Modelagem das perdas por evaporação e arraste em emissores de placa defletora fixa.

O procedimento para a elaboração das equações preditivas de perdas por evaporação e arraste em emissores de placa defletora fixa foi exatamente igual ao mencionado anteriormente para emissores de placa rotativa oscilante. Foi gerado uma simulação de diversos modelos de regressão linear simples e/ou múltipla, onde foram analisados os coeficientes de determinação R^2 (Tabela 25) juntamente com a significância da variável independente. Para efeito de simulação e ajustes das equações preditivas, consideramos as variáveis climáticas (Tabela 17) que foram monitoradas durante os 94 testes em campo.

Tabela 25– Variáveis climáticas utilizadas para geração dos modelos empíricos para os emissores de placa defletora fixa e seus respectivos R^2 .

Modelo	Variáveis	R^2	R^2 ajustado	A	B	C	D	E
01	1	0,715	0,712			*		
02	2	0,719	0,713			*	*	
03	3	0,723	0,714	*	*	*		
04	4	0,726	0,713	*	*	*	*	
05	5	0,726	0,710	*	*	*	*	*

As hipóteses testadas, as variáveis independentes e o nível de significância de α 0,05 foram os mesmos para ambos os emissores. O que variou foi o número de observações que foi menor para os emissores de placa fixa (94 observações).

Seguindo o mesmo comportamento dos emissores de placa rotativa oscilante, o modelo 01 foi gerado a partir dos dados dos emissores de placa fixa e considerou apenas a variável independente velocidade do vento e novamente ambos os β se mostraram significativos, com $t_{\text{calc.}} > t_{\text{tab.}}$ e $p\text{-valor} < \alpha$ 0,05 rejeitando a hipótese 0 (Tabela 26). A partir desta análise observa-se que a variável independente (velocidade do vento) exerce influência na variável dependente (PEA). Esse modelo obteve um valor do coeficiente de determinação $R^2 = 0,71$ fornecendo informação de quão adequado é o modelo para descrever esse fenômeno.

Tabela 26 – Tabela referente ao modelo 01, com os valores de β_0 e β_1 , além dos valores de erro padrão, teste t e p-valor, para emissores de placa defletora fixa.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	0,0356	0,00868	4,095	<0,001
Velocidade do Vento	0,0642	0,00422	15,206	<0,001

A partir da análise de variância do modelo 01 (Tabela 27), obteve-se um valor de F calculado superior ao F tabelado ($F_{\text{calc.}} 231,22 > F_{\text{tab.}} 3,92$), além do valor de p-valor $< \alpha 0,05$, confirmando a influência da variável independente velocidade do vento na variável dependente PEA.

Tabela 27– Análise de variância para o modelo 01 para emissores de placa fixa.

	Graus Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Regressão	1	0,467	0,467	231,226	<0,001
Resíduo	92	0,186	0,002		
Total	93	0,653	0,007		

Para identificar a normalidade dos dados observados, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk onde se obteve um valor de p calculado de 0,669 menor que o p tabelado (0,947), indicando que os dados seguem uma distribuição normal. O modelo 01 gerado a partir deste experimento com emissores de placa defletora fixa é uma regressão linear simples (Equação 13) composto por apenas uma variável independente (velocidade do vento) em relação à variável dependente (PEA).

$$\text{PEA \%} = 100 * (0.0356 + (0.0642 * V_v)) \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

PEA = Perdas por Evaporação e Arraste, %

V_v = Velocidade do vento, ms^{-1}

Seguindo a mesma metodologia aplicada para os dados coletados com emissores de placa defletora rotativa oscilante, foram gerados 5 distintos modelos para os emissores de placa defletora fixa e os resultados estão apresentados nas tabelas a seguir (Tabelas 28, 29, 30, 31). Em ambos os emissores somente a variável independente velocidade do vento se mostrou estatisticamente significativo com valores de t calculado maiores que o t tabelado e valores de p-valor menores que $\alpha 0,05$, rejeitando assim a hipótese 0 e comprovando que a variável independente (velocidade do vento) exerce uma influência na variável dependente (PEA). O comportamento das variáveis independentes fora similar em ambos os emissores. Os modelos considerando os emissores de placa defletora fixa obtiveram um R^2 de aproximadamente 0,72, porém não se recomenda a utilização de todos os modelos, tendo em vista que as constantes e as demais variáveis independentes não se mostraram estatisticamente significativas na maioria dos modelos.

Tabela 28 – Modelo 02 com os valores das variáveis independentes e seus respectivos valores de erro padrão, teste t e p-valor.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	0,0375	0,00887	4,228	<0,001
Velocidade do vento	0,0676	0,00526	12,852	<0,001
Radiação	-0,00002	0,0000187	-1,059	0,293

Tabela 29 – Modelo 03 com os valores das variáveis independentes e seus respectivos valores de erro padrão, teste t e p-valor.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	-0,135	0,110	-1,228	0,223
Temperatura	0,004	0,003	1,418	0,160
Umidade Relativa	0,0012	0,0008	1,553	0,124
Velocidade do Vento	0,0643	0,0058	11,16	<0,001

Tabela 30 – Modelo 04 com os valores das variáveis independentes e seus respectivos valores de erro padrão, teste t e p-valor.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	-0,124	0,110	-1,13	0,262
Temperatura	0,0044	0,003	1,47	0,145
Umidade Relativa	0,001	0,0008	1,33	0,188
Velocidade do Vento	0,066	0,006	10,96	<0,001
Radiação	-0,00002	0,00002	-0,94	0,349

Tabela 31 – Modelo 05 com os valores das variáveis independentes e seus respectivos valores de erro padrão, teste t e p-valor.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	-0,162	0,191	-0,847	0,399
Temperatura	0,004	0,0037	1,06	0,291
Umidade Relativa	0,0016	0,0023	0,7	0,486
Velocidade do Vento	0,066	0,00612	10,80	<0,001
Radiação	-0,0000185	0,00002	-0,88	0,378
Déficit de Pressão	0,0147	0,064	0,243	0,808

5.6. Comparação do Desempenho dos Emissores em Relação as Perdas por Evaporação e Arraste.

A partir das análises das perdas por evaporação e arraste – PEA, é possível identificar um comportamento similar entre os emissores de placa defletora fixa e rotativa oscilante. Em ambos os casos os valores de PEA estão diretamente relacionados com a variável velocidade do vento, em uma relação direta, em que a medida que a velocidade do vento aumenta as PEA também aumentam, em diferentes proporções de acordo com o emissor utilizado (Figura 15).

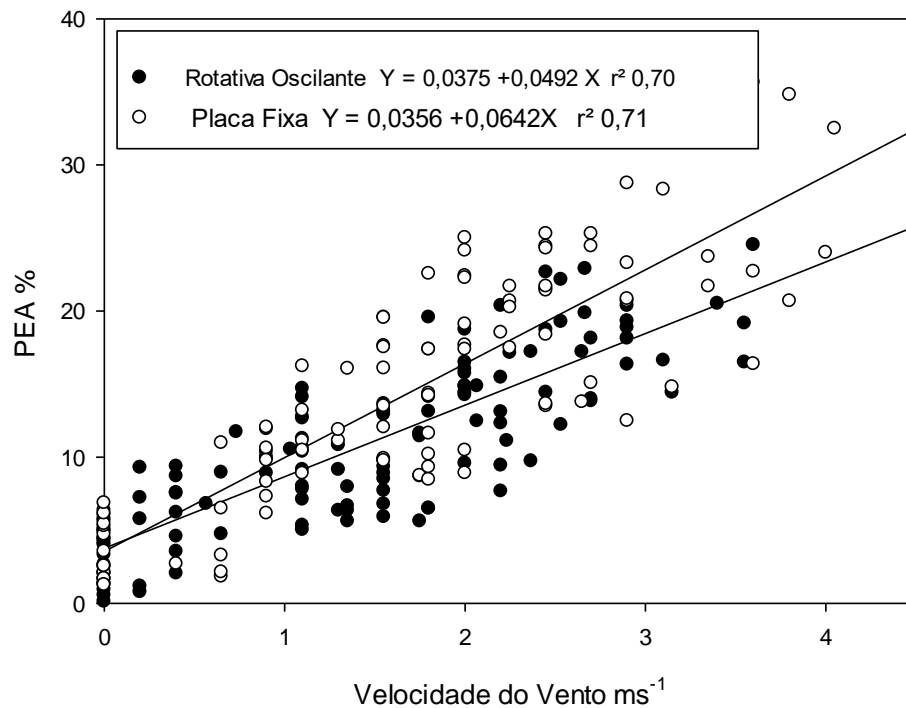


Figura 15. Comparativo entre as perdas por evaporação e arraste em ambos os emissores.

Todavia, foi possível observar em campo e identificar nas análises, que os emissores de placa fixa sofreram maior influência da velocidade do vento e obtiveram maiores valores de PEA (Tabela 32). A partir da análise do gráfico e as respectivas análises estatísticas, observa-se que o β_1 para emissores de placa fixa é maior (inclinação da reta), o que confirma a maior influência da variável independente (velocidade do vento) em relação à variável dependente PEA. Porém, em condições de clima favorável (velocidade do vento abaixo de 1,20m/s) os emissores de placa fixa apresentaram um desempenho tão satisfatório quanto os emissores de placa rotativo. Nessas condições, ambos os emissores tiveram um desempenho excelente, observa-se que os β_0 são bem próximos para ambos os emissores, o que mostra que nessas condições de clima, o desempenho de eficiência de aplicação é igual para ambos os emissores.

Tabela 32 – Resumo das PEA estratificadas para ambos os emissores.

Placa	Variável	Amplitude	Máximo	Mínimo	25 – 75%	<25%	>75%
Fixa	PEA %	34,4	35,7	1,3	14	8,75	21,5
Rotativo	PEA %	24,4	24,5	0,1	9,95	6,21	14,9

Considerando somente a situação mencionada acima, em que a velocidade do vento se concentrou no intervalo de 0 m/s até 1,20m/s, ambos os emissores tiveram um desempenho excelente e com valores de β_0 bem próximos. Os valores de PEA foram estratificados em quartis e os resultados foram descritos na tabela a seguir (Tabela 33).

Tabela 33– Resumo das PEA para ambos os emissores em um intervalo de velocidade do vento de 0m/s até 1,20 m/s.

Placa	Máximo	Mínimo	Média	< 25%	25 – 75%	>75%
Fixa	16,20%	1,20%	6,2%	2,50%	5,40 %	9,50%
Rotativo	14,70%	0,10%	6,4 %	3,50%	5,90%	9,20%

Para este intervalo de velocidade do vento, foram realizados 58 testes para os emissores de placa rotativa oscilante com uma média de 6,4% de PEA, enquanto que para os emissores de placa fixa foram realizados 31 testes e se obteve um valor médio de 6,2% de PEA (Figura 16).

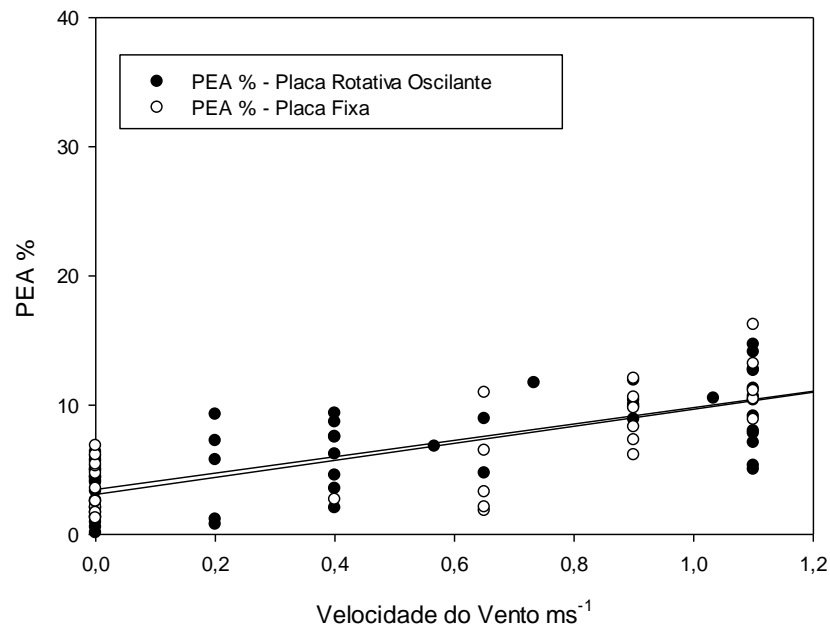


Figura 16. Comparativo de PEA para ambos os emissores, considerando o intervalo de velocidade do vento de 0ms⁻¹ até 1,20ms⁻¹.

A partir da velocidade do vento 1,20 ms⁻¹ as diferenças no comportamento dos emissores começam a se destacar. Observa-se no gráfico a seguir (Figura 17), que os valores de PEA para os emissores de placa fixa começam a ficar concentrados em uma faixa acima dos emissores de placa rotativa, uma diferença de aproximadamente 3 - 4% maior para os emissores de placa fixa.

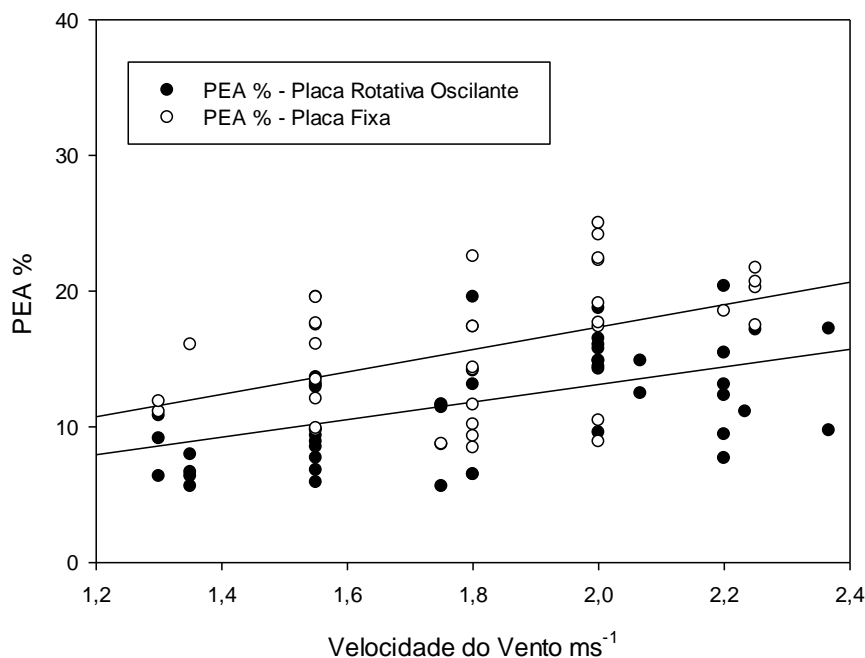


Figura 17. Comparativo de PEA para ambos os emissores, considerando o intervalo de velocidade do vento $1,20 \text{ ms}^{-1}$ até $2,40 \text{ ms}^{-1}$.

Para esta análise foi considerado um intervalo de velocidade do vento de $1,20 \text{ m/s}$ até $2,40 \text{ m/s}$, com 51 amostras para os emissores de placa rotativo e uma média de $11,9\%$ de PEA, e 34 amostras para os emissores de placa fixa com valor médio de $15,8\%$ (Tabela 34).

Tabela 34 – Resumo das PEA para ambos os emissores em um intervalo de velocidade do vento de $1,20 \text{ ms}^{-1}$ até $2,40 \text{ ms}^{-1}$.

Placa	Máximo	Mínimo	Média	< 25%	25 – 75%	>75%
Fixa	25%	8,50%	15,8%	11,10%	16,70%	19,50%
Rotativo	20,40%	5,60%	11,9 %	8,50%	11,60%	14,90%

Para velocidades acima de $2,40 \text{ ms}^{-1}$ o desempenho dos emissores de placa fixa continuaram inferior quando comparado aos emissores de placa rotativa oscilante (Figura 18). Foram realizados 29 testes com emissores de placa fixa com uma velocidade do vento variando de $2,40 \text{ ms}^{-1}$ até $4,05 \text{ ms}^{-1}$, um valor médio de $3,01 \text{ ms}^{-1}$ para velocidade do vento e $22,6\%$ para PEA. Considerando os emissores de placa rotativo oscilante foram realizados 25 testes com velocidade do vento variando em um intervalo de $2,40 \text{ ms}^{-1}$ até $3,60 \text{ ms}^{-1}$ e um valor médio de $2,85 \text{ ms}^{-1}$ e $18,4\%$ de PEA (Tabela 35).

Tabela 35 – Resumo das PEA para ambos os emissores em velocidades do vento acima de 2,40m/s.

Placa	Máximo	Mínimo	Média	< 25%	25 – 75 %	> 75%
Fixa	35,7%	12,5%	22,6%	17,9%	22,7%	25,3%
Rotativo	24,5%	12,2%	18,4%	16,5%	18,9%	20,4%

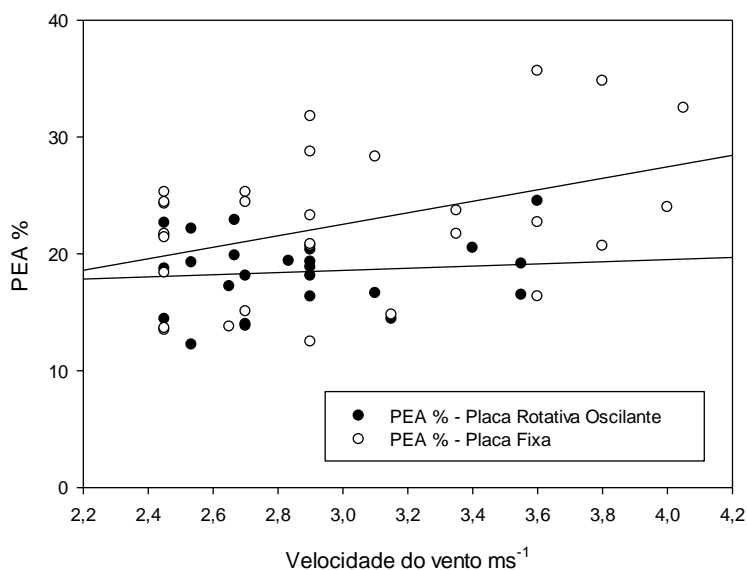


Figura 18. Comparativo de PEA para ambos os emissores, considerando o intervalo de velocidade do vento acima de $2,40 \text{ ms}^{-1}$.

Após a análise das perdas por evaporação e arraste em intervalos específicos de velocidade do vento, conclui-se que os emissores de placa defletora rotativa oscilante possuem melhor desempenho em situações de velocidade do vento mais elevada (acima de $1,20 \text{ ms}^{-1}$), porém em condições de vento abaixo de $1,20 \text{ ms}^{-1}$, ambos os emissores têm um desempenho em relação a eficiência de aplicação semelhantes.

5.7. Análise de Identidade de Modelos

A partir da metodologia de análise de modelos citado por Regazzi e Silva (2010), foi possível avaliar os modelos gerados e identificar se um modelo reduzido seria suficiente para representar as perdas por evaporação e arraste para ambos os emissores. Nas análises a seguir foi considerado os dados obtidos somente no intervalo de 0 a $3,60 \text{ m/s}$ para ter todos os dados de ambos os emissores concentrados em um mesmo intervalo de velocidade do vento. As classes foram classificadas como:

- Classe 01 sendo os emissores de placa defletora rotativo oscilante;
- Classe 02 os emissores de placa defletora fixa;

O primeiro passo dessa análise, foi uma análise da variância do modelo completo (Tabela 36), considerando os dois tipos de emissores, além da estimativa dos parâmetros das equações individualizadas, com β_0 e β_1 distintos para cada caso (Tabela 36).

Tabela 36 – Análise de Variância do Modelo Completo para a Identidade de Modelos.

Fonte de Variação	Graus liberdade	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Modelo	4	4,04	1,00	715,67	0,0001
Resíduo	220	0,32	0,001		
Total	224	4,36			

Tabela 37 – Estimativa dos Parâmetros – Equações individualizadas

Classes	β_0	β_1
1	0,0379	0,0489
2	0,0349	0,0646

A partir da análise do modelo completo, foi gerado um modelo reduzido tentando explicar o fenômeno de perdas por evaporação e arraste em relação à velocidade do vento, para ambos os emissores. Foi realizado uma análise de variância para o modelo reduzido (Tabela 38) e as respectivas estimativas dos parâmetros (Tabela 39).

Tabela 38 – Análise de Variância do Modelo reduzido para a identidade de Modelos.

Fonte de Variação	Graus liberdade	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Modelo	2	4,0	2,0	1276,4	0,0001
Resíduo	222	0,3482	0,0016		
Total	224	4,3482			

Comparando as duas equações ajustadas, através do teste de identidade de modelos, verificou-se que o modelo reduzido difere do modelo completo (p-valor < 0,0001). Portanto, um único modelo reduzido não é adequado para representar as perdas por evaporação e arraste de ambos os emissores em função da velocidade do vento. Assim, torna-se necessário a utilização de modelos distintos de acordo com a placa defletora utilizada.

Tabela 39 – Estimativa dos Parâmetros – Modelo Reduzido

β_0	0,0357
β_1	0,0566

Tendo em vista que o modelo reduzido não foi válido para explicar tal fenômeno, foram realizados testes de identidades para os parâmetros da equação, para se obter uma melhor compreensão dos modelos e dos parâmetros gerados. Na tabela 40, pode-se observar a análise de variância para um modelo reduzido, considerando os β_0 idênticos.

Tabela 40 – Tabela de Análise da Variância – Modelo reduzido - β_0 idênticos.

Fonte de Variação	Graus liberdade	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Modelo	3	4,041	1,347	957,90	0,0001
Resíduo	221	0,310	0,0014		
Total	224	4,352			

Verificou-se que os interceptos (β_0) das duas equações são iguais estatisticamente (pvalor = 0,9999), tendo, portanto, uma estimativa comum para ambos os tipos de emissores ($\beta_0=3,68\%$). Isso pode ser visualizado pelo gráfico (Figura 16) de perdas por evaporação e arraste, em que as velocidades do vento próximas de 0ms^{-1} proporcionam perdas estimadas muito próximas para ambos os emissores.

Tabela 41– Estimativa dos parâmetros das equações individualizadas considerando o β_0 idêntico.

Classes	β_0	β_1
1	0,0368	0,0494
2	0,0368	0,0638

O mesmo procedimento foi realizado para análise do parâmetro β_1 , que explicita a influência da variável independente (velocidade do vento) na variável dependente PEA. Na tabela 42, observa-se a análise de variância para este modelo reduzido, considerando os β_1 idênticos.

Tabela 42 – Tabela de Análise da Variância – Modelo reduzido – β_1 idênticos.

Fonte de Variação	Graus liberdade	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Modelo	3	4,041	1,347	915,57	0,0001
Resíduo	221	0,310	0,0014		
Total	224	4,352			

De acordo com o teste de igualdade dos coeficientes lineares (β_1) das duas equações, verificou-se que estes coeficientes diferem estatisticamente (p-valor = 0,00224). O que indica que o modelo mais adequado deve incluir estimativas diferentes do coeficiente β_1 para cada tipo de emissor. Estes resultados comprovam que a variável velocidade do vento exerce uma maior influência nas perdas por evaporação e arraste nos

emissores de placa defletora fixa quando comparado com os emissores de placa defletora rotativa oscilante.

De acordo com a análise de identidade de modelos, considerando o intercepto (β_0) igual para ambos os emissores, foram gerados dois novos modelos (Equações 12 e 13), considerando o mesmo intervalo de velocidade do vento (0 – 3,60ms⁻¹).

$$\text{Placa Defletora Fixa: } PEA = 100*(0,0368 + 0,0638Vv) \quad (\text{Equação 12})$$

$$\text{Placa Defletora Rotativa Oscilante: } PEA = 100*(0,0368 + 0,0494Vv) \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

PEA: Perdas por Evaporação e Arraste, %

Vv: Velocidade do Vento, m/s

5.8. Comparação com outros modelos empíricos para estimativas das perdas por evaporação e arraste.

A partir dos dados coletados durante os ensaios de precipitação foi possível aplicar alguns modelos empíricos que estão descritos na literatura e comparar os valores estimados com os valores observados em campo. O desempenho dos modelos foi analisado a partir dos dados coletados nos testes em campo com os distintos emissores. Para a interpretação dos gráficos considerou-se o índice de confiança de desempenho (c) desenvolvido por Camargo & Sentelhas.

Para os emissores de placa defletora rotativa oscilante destaca-se o modelo de Dechmi et al. (2003) classificado como “bom” com um índice de confiança “c” igual a 0,67. Os autores deste modelo destacam que o mesmo é pouco eficiente em situações com baixa velocidade de vento, superestimando os valores de perdas por evaporação e arraste, o que fica evidenciado quando observa-se a Figura 19A. Destaca-se os valores elevados de perdas estimadas quando comparadas com os valores iniciais das perdas observadas (até 10%), intervalo em que os menores valores de PEA se encontram nas situações com menor velocidade do vento. Neste estudo, os autores registraram perdas variando de 6,0% até 40%, e a variável independente velocidade do vento foi a única que se mostrou significativa estatisticamente. Os demais modelos testados não obtiveram classificações satisfatórias com valores de índice de confiança “c” concentrando de 0,43 até 0,63 e uma classificação variando de mau a mediano.

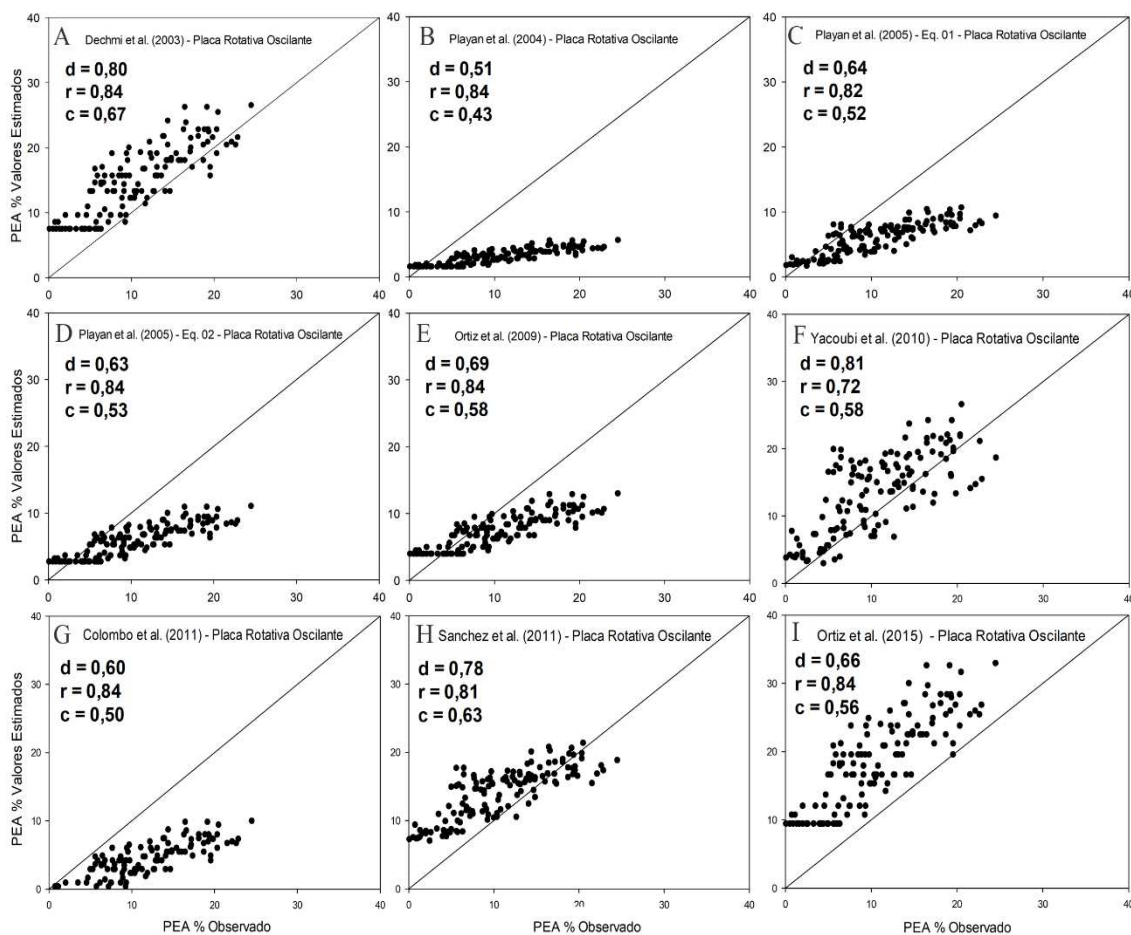


Figure 19. Gráficos comparativos entre os valores observados com os valores estimados dos modelos empíricos testados, considerando os emissores de placa defletora rotativa oscilante.

O modelo de Playán et al. (2004) foi realizado através de uma máquina experimental de irrigação que simula um sistema de irrigação via pivô central e foi desenvolvido para as condições meteorológicas de Zaragoza, Espanha. Os valores de PEA obtidos ficaram no intervalo de 0,3 a 8,3% e utilizaram a velocidade do vento como a variável independente que melhor explica as PEA. Devido aos baixos valores de PEA obtidos, o índice de confiança de desempenho foi classificado como “mau” com um “c” de 0,43 (Figura 19B). A partir desta máquina experimental, Playán et. al. (2005) desenvolveram outros modelos para estimativa das PEA. No estudo mais recente foram obtidos valores de PEA variando de 1,2% a 14,7% com um valor médio de 6,6%. Além disso, os autores destacaram a diferença dos valores observados em irrigações noturnas que foram aproximadamente de 5% e irrigações durante o dia de 9,8%

Diversos modelos foram gerados neste estudo em discussão, dois modelos que representavam as PEA para diferentes horários e condições de aplicação foram selecionados para a comparação. O primeiro modelo foi selecionado utilizando 2 variáveis independentes, velocidade do vento e temperatura (Figura 19C), enquanto que

a segunda equação preditiva selecionada considera apenas a velocidade do vento como variável independente (Figura 19D). Os dados observados em campo para os emissores de placa defletora rotativa oscilante não obtiveram um desempenho satisfatório e foram classificados como sofrível para ambos os modelos de Playan et al. (2005).

O modelo proposto por Ortiz et al. (2009) foi desenvolvido para as condições meteorológicas de Albacete, Espanha utilizando de um sistema de irrigação por pivô central, onde foram testados emissores de placa defletora rotativa oscilante. O modelo foi gerado a partir da variável independente velocidade do vento, que melhor explicou estatisticamente as PEA, além disso o modelo considerou os valores de perdas observados de ambos os emissores e obteve um desempenho classificado como “Sofrível” com valores de “c” igual 0,58 (Figura 19E). O mesmo desempenho pode ser observado no modelo elaborado por Yacoubi et al. (2010) (Figura 19F) que foi elaborado para a região da Aritana, Tunísia, onde foi utilizado um sistema de irrigação por aspersão convencional.

Em um estudo mais recente Ortiz et al. (2015) elaboraram um modelo empírico para as condições climáticas de Cabudarle no estado de Lara, Venezuela utilizando emissores de aspersão convencional. Neste experimento foram observadas perdas variando de 9,4% a 43,7% com um valor médio de 26,3%. Observa-se no Figura 19I que os pontos se encontram acima da reta, o que significa uma superestimação dos valores de PEA e um índice de confiança “c” de 0,56 e uma classificação como sofrível.

Para o experimento de Colombo et al. (2015), classifica-se o índice de confiança de desempenho como mau ($c=0,50$). Destaca-se uma melhor correlação dos emissores de placa defletora rotativa oscilante com o modelo sugerido quando comparado com os emissores placa defletora fixa, tendo em vista que as condições do experimento foram semelhantes às condições do qual observamos esses valores à campo, onde foi utilizado um sistema de irrigação pivô central, com reguladores de pressão nominal de 69 kPa e emissores rotativos oscilantes instalados à uma altura do solo de aproximadamente 1,80m, nas condições climáticas do município de Bom Sucesso – MG, Brasil. O modelo sugerido por Colombo registrou valores de PEA% variando de 0,2% até 9,9 % com um valor médio de 3,38%. Este modelo foi elaborado a partir de testes a campo, porém com somente 12 observações diurnas e uma velocidade do vento baixa, o que pode ter influenciado para a obtenção de valores de PEA% inferiores aos observados a campo.

Os modelos empíricos testados com os valores observados nos testes com emissores de placa defletora fixa obtiveram melhores correlações em relação ao PDRO. Destacam-se os modelos de Dechmi et al. (2003), Yacoubi et al. (2010), Sanchez et

al.(2011) e Ortiz et al.(2015) que obtiveram uma classificação “boa” com o índice de confiança “c” de 0,74 , 0,68, 0,71 e 0,73 (Figuras 20A, F, H, I), respectivamente.

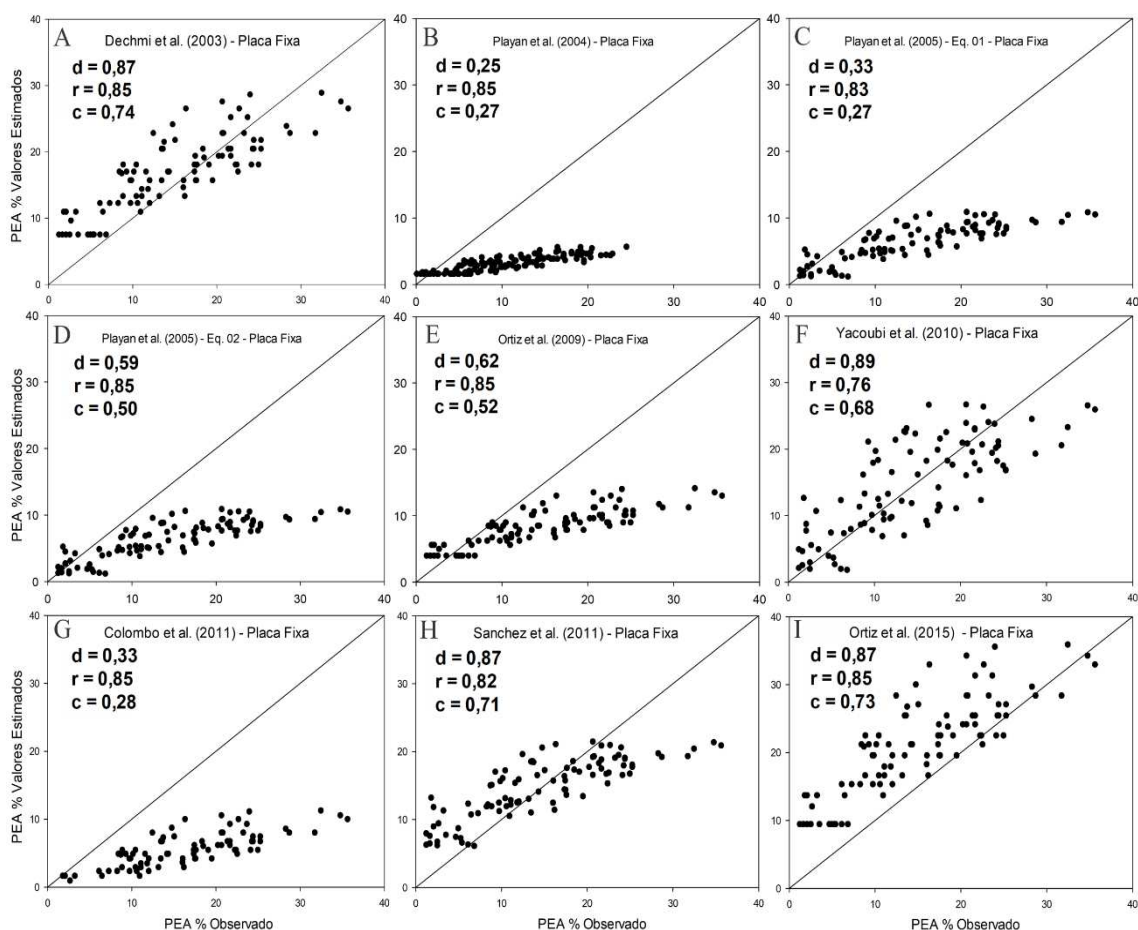


Figure 20. Gráficos comparativos entre os valores observados com os valores estimados dos modelos empíricos testados, considerando os emissores de placa defletora fixa.

Os modelos elaborados por Playan et al. (2004) e Playan et al. (2005) obtiveram classificação “mau” com valores de índice de confiança “c” variando de 0,42 até 0,50 (Figura 20 B, C, D) semelhante ao modelo de Ortiz et al. (2009) que também apresentou classificação “mau” com “c” de 0,52(Figura 20E). O modelo de Colombo et al. (2015) apresentou o índice de confiança mais reduzido com valor de “c” igual a 0,28. Porém, este modelo foi elaborado para emissores de placa defletora rotativa oscilante com poucos testes e baixa velocidade do vento, proporcionando baixos valores de PEA estimado.

Analisando os modelos de Dechmi et al. (2003), Ortiz et al. (2015), Yacoubi et al. (2010), Sanchez et al. (2011) onde foram utilizados sistemas de aspersão convencional e alcançaram valores elevados de PEA (até 43 % de PEA). Tais modelos, apresentaram uma melhor correlação com os emissores de placa defletora fixa, que de acordo com as análises também apresentaram elevadas perdas por evaporação e arraste, chegando a 35,7 %.

6. Conclusões

Os emissores de placa defletora rotativa oscilante obtiveram um melhor desempenho no âmbito da uniformidade de distribuição e na eficiência de aplicação, com valores médios de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen 3% maiores e uma eficiência de aplicação 4% superior quando comparado com os emissores de placa defletora fixa.

Foram ajustadas duas equações distintas para estimar as perdas por evaporação e arraste em função da velocidade do vento e de acordo com o tipo de emissor. A velocidade do vento foi a única variável independente que se mostrou significativa estatisticamente, e se comportou linear e positivamente em relação as PEA. As equações possuem um intercepto (β_0) idêntico, o que nos explica que em condições de baixa velocidade do vento (próximo de 0ms^{-1}) as PEA são idênticas, porém a variável independente exerceu maior influência em emissores de placa fixa.

Dentre os modelos já existentes, o modelo de Dechmi et al. (2003) apresenta classificação boa para ambos os emissores. Para os emissores com placa defletora fixa, outros três modelos obtiveram uma classificação boa, são eles: Yacoubi et al. (2010), Sanchez et al.(2011) e Ortiz et al.(2015).

7. Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS & Embrapa. **Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil – 2014: Relatório Síntese**. Brasília: ANA, 2016, 33 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas de Irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017, 86p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14244: **equipamentos de irrigação mecanizada: pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos: determinação da uniformidade de distribuição de água**. Rio de Janeiro, RJ, 1998

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

BESKOW, S.; FARIA, L. C.; COLOMBO, A.; MOURA, D. M. C. de. **Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste em aspersores de média pressão**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.3, p.221–228, jan. 2011.

BRASIL, Ministério da Integração Nacional. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Brasília: MI, 2014, 217p.

CÂMARA SETORIAL DE EQUIPAMENTOS DE IRRIGAÇÃO DA ABIMAQ. **Evolução das áreas com irrigação mecanizada no Brasil (2000-2014)**. Item, n. 103, 2015.

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, n.1, p.89-97, 1997.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. California: University of California, 1942.

COLOMBO, A.; FARIA, L. C.; SILVA JUNIOR, J. J. da.; SANT'ANA, J. A. do V. Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste de sprays de placa oscilante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.8, p.719–726, 2015.

Cruz, C.D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**. v.35, n.3, p.271-276, 2013

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; CAVERO, J. FACI, J. M.; MARTÍNEZ-COB, A. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays*). **Irrigation Science**, v. 22, p. 67-77, jun. 2003a.

FACI, J. M.; SALVADOR, R.; PLAYÁN, E.; ASCE, A. M.; SOURELL, H. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.127, p.224-233, 2001.

JIAO, J et al. - Comparison of Water Distribution Characteristics for Two Kinds of Sprinklers Used for Center Pivot Irrigation Systems. **Applied Sciences**, v.7 p.421 – 438, 2017.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. New York: NY.1990.

MONTERO, J.; TARJUELO, J.M.; CARRIÓN, P. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropuviometer. **Irrigation Science**. v. 22, (2), p. 47–56, 2003.

Ortíz, J.N., Tarjuelo, J.M., Juan, J.A.Characterisation of evaporation and drift losses with centre pivots. **Agricultural Water Management**. V.96, p.1541-1546, 2009

PLAYÁN, E.; GARRIDO, S.; FACI, J.M.; GALÁN, A. Characterizing pivot sprinklers using and experimental irrigation machine. **Agricultural Water Management**, v. 70, p. 177-193, 2004.

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.

REGAZZI, Adair José; SILVA, Carlos Henrique Osório. Testes para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear em dados de experimento com delineamento em blocos casualizados. **Rev. Ceres**, v. 57, (3), p. 315-320, 2010

SANCHEZ, I.; FACI, J. M.; ZAPATA, N. The effects of pressure, nozzle diameter and meteorological conditions on the performance of agricultural impact sprinklers. **Agricultural Water Management**, v. 102, p. 13 -24, nov. 2011.

Smajstrla, A. G.; Zazueta, F. S. Evaporation loss during sprinkler irrigation. **Agricultural and Biological Engineering Department**. Florida, 2003. 8 p.

TARJUELO, J. M.; ORTEGA, J. F.; MONTERO, J.; JUAN, J. A. Modeling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, v.43, p. 263-284, jul. 2000

YACOUBI, S. et al. Day and night time sprinkler irrigated tomato: irrigation performance and crop yield. **Biosystems Engineering**, v. 107, p. 25-35, 2010.