

MATHEUS AMORIM CALIMAN

**MODELAGEM DAS PERDAS POR EVAPORAÇÃO E ARRASTE EM 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*.

Orientadora: Catariny Cabral Aleman

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal
de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C153m
2020

Caliman, Matheus Amorim, 1994-

Modelagem das perdas por evaporação e arraste em pivô
central / Matheus Amorim Caliman. – Viçosa, MG, 2020.
69 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Catariny Cabral Aleman.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.60-69.

1. Irrigação por aspersão. 2. Distribuição de água.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

II. Título.

CDD 22. ed. 631.587

MATHEUS AMORIM CALIMAN

**MODELAGEM DAS PERDAS POR EVAPORAÇÃO E ARRASTE EM PIVÔ
CENTRAL**

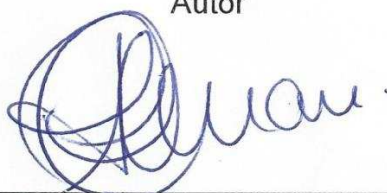
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Matheus Amorim Caliman
Autor



Catariny Cabral Aleman
Orientadora

Dedico esse trabalho ao amigo e professor Silvio Bueno Pereira, *in memoriam*

AGRADECIMENTOS

A Deus por minha vida, família e amigos.

Aos meus pais, Carla e Lucio, pelo amor incondicional e por não medirem esforços para essa vitória.

Aos meus irmãos, Lucio Flavio, Clara e Anna, pelo amor, carinho e cumplicidade.

Aos meus avós, Mario, Geraldo, Alzira, *in memoriam* e Angela, pelo amor e por sempre cuidarem de mim.

À minha boadrasta, Verônica, pelos conselhos, amizade e carinho.

Ao Luciano pelo companheirismo, amizade, incentivo e grande ajuda durante todo o mestrado.

À professora Catariny Cabral Aleman pela valiosa orientação, amizade, ensinamentos e carinho.

Aos professores Fernando França Cunha e Carlos Augusto Brasileiro de Alencar pelos ensinamentos e valiosa colaboração.

Aos amigos que tive o prazer de conhecer durante todo o período em Viçosa. Vocês fizeram com que o período na cidade fosse o melhor possível, e nunca me esquecerei de vocês.

A empresa Nelson por fornecer o material para realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa – UFV e o Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade da realização deste curso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda” (Paulo Freire)

RESUMO

CALIMAN, Matheus Amorim, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Modelagem das perdas por evaporação e arraste em pivô central.** Orientadora: Catariny Cabral Aleman.

As perdas por evaporação e arraste são um dos principais fatores para reduzir a eficiência de aplicação e uniformidade de distribuição em sistemas de irrigação por aspersão. No pivô central, dependendo do modelo e características do emissor as perdas ao aplicar a lâmina de irrigação podem variar. Dessa forma o objetivo deste trabalho foi avaliar e modelar as perdas de evaporação e arraste (PEA) de um pivô central e uniformidade do sistema em diferentes condições meteorológicas para dois modelos de emissores na região da Zona da Mata Minas Gerais. Foram realizados ensaios de campo com o pivô central equipado com emissores do tipo Orbitor e Rotator durante o período diurno e noturno em diferentes horários, visando uma maior abrangência dos dados meteorológicos. As PEA foram estimadas por meio de sete modelos matemáticos apresentados pela literatura, os quais foram comparados com os dados obtidos em campo para verificar a aderência dos modelos aos dados coletados. Os valores de PEA para os emissores Orbitor e Rotator variaram de 3,98 a 38,01% e 3,87 a 33,8%, respectivamente. As perdas estimadas pelos modelos apresentados na literatura, de modo geral, não se ajustaram bem aos dados obtidos em campo. Neste sentido, foi necessário a criação de um modelo para ajustar aos dados dos emissores estudados. O modelo gerado considerou as variáveis meteorológicas velocidade do vento e temperatura do ar como as mais explicativas das PEA, apresentando um ajuste bom para ambos os emissores. Verificou-se pela identidade dos modelos que o emissor Orbitor é mais suscetível às PEA. Na análise de uniformidade do sistema analisou-se para ambos os emissores o Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), distribuição (CUD) e absoluto (CUA). Obtendo CUC, CUD e CUA de 82 e 82%, 73 e 73% e 69 e 65% para os emissores Rotator e Orbitor, respectivamente. Após a determinação das PEA e avaliação da uniformidade no pivô central, conclui-se que apenas a velocidade do vento e temperatura do ar influenciaram nos resultados obtidos e recomenda-se utilizar o emissor Rotator.

Palavras-chave: Irrigação. Uniformidade. Aspersão.

ABSTRACT

CALIMAN, Matheus Amorim, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, February, 2020.
Modeling of wind drift and evaporation losses in a center pivot. Adviser: Catariny Cabral Aleman.

Wind drift and evaporation losses (WDEL) are one of the main factors to reduce application efficiency and distribution uniformity in sprinkler irrigation systems. In the central pivot, depending on the model and characteristics of the sprinklers, the losses when applying the irrigation depth can vary. Thus, the objective of this work was to evaluate and model the WDEL of a central pivot and system and the uniformity in different weather conditions for two sprinklers type in the Zona da Mata region of Minas Gerais. Field tests were carried out with the central pivot equipped with the sprinklers Orbitor and Rotator during the day and night at different times, aiming at a wider range of meteorological data. The WDEL were estimated using seven mathematical models presented in the literature, which were compared with the data obtained in the field to verify the models' adherence to the collected data. The WDEL values for the Orbitor and Rotator sprinklers ranged from 3.98 to 38.01% and 3.87 to 33.8%, respectively. The losses estimated by the models presented in the literature, in general, did not fit well with the data obtained in the field. So, it was necessary to create a model to adjust to the data of the studied emitters. The generated model considered the meteorological variables wind speed and temperature as the most explanatory of the WDEL, presenting a good fit for both sprinklers. It was verified by the identity of the models that the Orbitor sprinkler is more susceptible to WDEL. In the system uniformity analysis, Christiansen's uniformity coefficient (CUC), distribution (CUD) and absolute (CUA) were analyzed for both sprinklers. Obtaining CUC, CUD and CUA of 82 and 82%, 73 and 73% and 69 and 65% for the Rotator and Orbitor sprinklers, respectively. After determining the WDEL and evaluating uniformity in the central pivot, it is concluded that only the wind speed and air temperature influenced the results obtained and it is recommended to use the Rotator sprinkler.

Keywords: Irrigation. Uniformity. Sprinkling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - a) Emissor Rotator. b) Emissor Orbitor. c) Válvula reguladora de pressão de 10 Psi.	20
Figura 2 - Disposição e espaçamento dos coletores no pivô central e posição da casa de bombas.	22
Figura 3 - Comparação percentual da vazão coletada com a vazão de catalogo do emissor Orbitor	32
Figura 4 - Comparação percentual da vazão coletada com a vazão de catalogo do emissor Rotator	32
Figura 5 - Resultado das PEA Observadas do aspersor Orbitor em função das PEA Estimada por outros modelos	38
Figura 6 - Resultado das PEA Observadas do aspersor Rotator em função das PEA Estimada por outros modelos	39
Figura 7 - PEA em função da velocidade do vento quando a temperatura do ar é mantida constante	53
Figura 8 - Lâmina média ponderada e lâmina aplicada pelo emissor Orbitor ao longo do raio do pivô central	56
Figura 9 - Lâmina média ponderada e aplicada pelo emissor Rotator ao longo do raio do pivô central	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis que afetam as perdas por evaporação e arraste de acordo com diferentes autores.....	17
Tabela 2 - Modelos gerados com os dados climáticos e PEA	23
Tabela 3 - Modelos empíricos propostos para determinação de perdas por evaporação e arraste (PEA)	26
Tabela 4 - Análise de desempenho com base no índice de desempenho	27
Tabela 5 - Classificação do CUC e CUD, de acordo com a metodologia de Mantovani (2001).....	28
Tabela 6 - Classificação do CUA, de acordo com a metodologia de Bralts (1986) ...	29
Tabela 7 – Vazão coletada e vazão de catalogo dos emissores do modelo Orbitor .	30
Tabela 8 - Vazão coletada em nível de campo comparada com a vazão de catalogo dos emissores do modelo Rotator.....	31
Tabela 9 - PEA, velocidade do vento (V_v), temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR) e déficit de pressão de vapor (Δe) com o emissor Orbitor operando em diferentes horários.....	34
Tabela 10 - PEA, velocidade do vento (V_v), temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR) e déficit de pressão de vapor (Δe) com o emissor Rotator operando em diferentes horários.....	35
Tabela 11 - Valores máximos, mínimos e médios das PEA, condições atmosféricas observados e lâmina coletada para o emissor Orbitor	36
Tabela 12 - Valores máximos, mínimos e médios das PEA, condições atmosféricas observados e lâmina coletada para o emissor Rotator.....	36
Tabela 13 - Resumo referente ao modelo 01 com os coeficientes β_0 e β_1 , erro padrão, teste t de Student e p-valor	46
Tabela 14 - Resumo referente ao modelo 02 com os coeficientes β_0 , β_1 e β_2 , erro padrão, teste t de Student e p-valor	46

Tabela 15 - Resumo referente ao modelo 03 com os coeficientes β_0 , β_1 , β_2 e β_3 erro padrão, teste t de Student e p-valor	46
Tabela 16 - Resumo referente ao modelo 04 com os coeficientes β_0 , β_1 , β_2 , β_3 e β_4 erro padrão, teste t de Student e p-valor	47
Tabela 17 - Análise de Variância para o modelo selecionado do emissor Orbitor	47
Tabela 18 - Resumo referente ao modelo 01 com os coeficientes β_0 e β_1 , erro padrão, teste t de Student e p-valor	48
Tabela 19 - Resumo referente ao modelo 02 com os coeficientes β_0 , β_1 e β_2 erro padrão, teste t de Student e p-valor	48
Tabela 20 - Resumo referente ao modelo 03 com os coeficientes β_0 , β_1 , β_2 e β_3 erro padrão, teste t de Student e p-valor	49
Tabela 21 - Resumo referente ao modelo 04 com os coeficientes β_0 , β_1 , β_2 , β_3 e β_4 erro padrão, teste t de Student e p-valor	49
Tabela 22 - Análise de Variância para o modelo selecionado do emissor Rotator....	49
Tabela 23 - Análise de Variância para o modelo reduzido, utilizando dados do emissor Orbitor e Rotator.....	51
Tabela 24 - Análise de Variância para o teste de igualdade com β_0 idênticos.....	52
Tabela 25 - Análise de Variância para o teste de igualdade com β_1 idênticos.....	52
Tabela 26 - Análise de Variância para o teste de igualdade com β_2 idênticos.....	52
Tabela 27 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente de Uniformidade Absoluto (CUA) para o emissor Orbitor.	54
Tabela 28 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente de Uniformidade Absoluto (CUA) para o emissor Rotator.....	55

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1.	Irrigação	14
2.2.	Perdas por evaporação e arraste	15
2.3.	Uniformidade de aplicação.....	17
3.	OBJETIVOS	19
3.1.	Objetivos específicos	19
4.	MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1.	Área de estudo.....	19
4.2.	Descrição do sistema de irrigação e estação de bombeamento	19
4.3.	Dados dos emissores.....	20
4.4.	Teste de vazão	20
4.5.	Uniformidade de aplicação.....	21
4.6.	Modelagem das perdas por evaporação e arraste	22
4.7.	Identidade de modelos.....	24
4.8.	Perdas por evaporação e arraste estimada por diferentes modelos	26
4.9.	Análise de uniformidade	27
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1.	Vazões e lâminas médias coletadas poderadas	29
5.2.	Perdas por evaporação e arraste	33
5.3.	Perdas por evaporação e arraste estimadas por diferentes modelos	37
5.4.	Modelo proposto para estimativa das perdas por evaporação e arraste do sistema	45
5.4.1.	Orbitor	46
5.4.2.	Rotator	48
5.5.	Identidade de modelos.....	51

5.6. Uniformidade de aplicação de água do sistema.....	53
CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

A irrigação é responsável por 64,8% do consumo de água do Brasil (ANA, 2018). Com a crescente demanda por recursos hídricos e a necessidade de minimizar os impactos ambientais advindos da irrigação (AL-GHOBARI; MOHAMMAD; EL MARAZKY, 2015), exige-se uma maior eficiência água para irrigação, com a finalidade de garantir a produção sustentável de alimentos (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

O Brasil apresenta aproximadamente uma área de 1,40 milhões de hectares irrigados por pivô central (ANA, 2017), sendo 47% localizado na região sudeste (ANA; EMBRAPA, 2019). Sistemas de aspersão por pivô central são mundialmente reconhecidos por sua alta eficiência e uniformidade de aplicação de água (ROGERS *et al.*, 2017). Sendo, talvez, a tecnologia mais eficiente e avançada que pode ser usada para irrigação em ampla escala na produção agrícola (GOEBEL; LASCANO, 2019).

Os sistemas de irrigação são projetados para garantir que altos valores de coeficientes de uniformidade e eficiência sejam atingidos (OKER *et al.*, 2019). Porém variáveis como: velocidade e direção do vento, modelo, peso, espaçamento e diâmetro do bocal do emissor podem influenciar na uniformidade de aplicação do sistema (FARIA *et al.*, 2019) assim como o clima e válvula reguladora de pressão. A uniformidade de aplicação é uma variável que determina capacidade de um sistema de irrigação de aplicar a mesma quantidade de água em todos os lugares da área irrigada (MOHAMED *et al.*, 2019).

A mensuração dos índices de uniformidade pode ser expressa através de diferentes parâmetros ou coeficientes, sendo os Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) (CHRISTIANSEN, 1942) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) (MERRIAM; KELLER, 1978) os mais utilizados.

Um importante componente para eficiência nos sistemas de irrigação por aspersão é a água que se move pelo ar em direção à superfície do solo (MANKE *et al.*, 2019). Sob condições de vento uma parte considerável das gotas dos emissores podem ser levadas para longe da área irrigada e perdida (ADAMS; ZELEKE, 2017). Essa água perdida também é conhecida como perdas por evaporação e arraste (PEA) e seu conhecimento desempenha um papel importante no desenvolvimento de estratégias de conservação de água na irrigação por aspersão (AL-GHOBARI *et al.*, 2018).

As PEA reduzem a eficiência do uso da água e, portanto, diminuem a quantidade de água que atinge a zona radicular da planta (MAROUFPOOR *et al.*, 2018). Em

virtude da grande importância das influências climáticas sob a eficiência de aplicação dos sistemas e suas perdas por evaporação e arraste, a modelagem matemática tem grande potencial de prever PEA em diferentes locais sob diferentes climas. Diversos estudos foram realizados a fim de desenvolver modelos de simulação de irrigação que podem ser usados para estimar essas perdas sob condições reais ou controladas (SAYYADI *et al.*, 2012).

Modelos matemáticos são capazes de representar processos físicos de um sistema, e gerar informações que normalmente não são tão facilmente disponíveis (ANDRADE *et al.*, 2016). A importância de modelos na irrigação está na sua capacidade de fornecer informações necessárias para a tomada de decisão, dentro da finalidade do manejo e projeto de sistemas de irrigação. Esses modelos podem minimizar os testes em campo e otimizar o design e manejo da irrigação (MAREY; EL MARAZKY; ABOUKARIMA, 2018).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Irrigação

Água é um dos principais fatores limitantes para a agricultura no Brasil (BATTISTI *et al.*, 2018; SENTELHAS *et al.*, 2015). Com as mudanças climáticas dos últimos anos é esperado um aumento das temperaturas do ar e da evapotranspiração, colocando uma pressão adicional no já limitado abastecimento público de água para uso doméstico, industrial e agrícola (MONAGHAN *et al.*, 2013). As mudanças climáticas e seus efeitos perturbam significativamente a tendência e o padrão das chuvas (LOO; BILLA; SINGH, 2015). A distribuição das chuvas é um parâmetro hidrológico essencial que influencia diretamente a agricultura, afetando a disponibilidade de recursos hídricos (SINGH; PANDA; NAIR, 2019).

A utilização eficiente da água de irrigação está se tornando cada vez mais essencial nos países em desenvolvimento para alcançar segurança alimentar (ZENG; BIE; YUAN, 2009). Se a água aplicada durante a fase de crescimento da planta, não for suficiente para repor a demanda, a planta não atingirá o seu pico de produção (WELDE; GEBREMARIAM; KAHSAY, 2019). A estimativa correta da necessidade de água demandada com base nas características da planta e suas condições de crescimento, aliado com o manejo de irrigação adequado, aumentará a eficiência do uso da água na irrigação (ALBAJI *et al.*, 2015; ENTESARI; HEYDARI; KHEYRABI, 2007).

Nos últimos anos, as tecnologias em agricultura irrigada têm apresentado um papel essencial para o desenvolvimento da agricultura brasileira, melhorando o desempenho dos empreendimentos agrícolas, aumentando a possibilidade de expansão da fronteira agrícola e diminuindo os riscos climáticos associados a atividade agrícola (FERNANDES *et al.*, 2020).

Pivô central é o sistema de irrigação pressurizado mais popular do mundo (OUAZAA; BURGUETE; ZAPATA, 2016) sendo o sistema de irrigação que mais cresceu nos últimos 7 anos no Brasil (ANA; EMBRAPA, 2019). O uso de sistemas de irrigação por pivôs centrais possui grande expansão no mundo por causa de suas vantagens em relação a outros sistemas (MOHAMED *et al.*, 2019) como alta eficiência e uniformidade de aplicação de água (ROGERS *et al.*, 2017).

Atualmente a área irrigada por pivôs centrais o Brasil é de aproximadamente 1,4 milhões de ha, ocorrendo em áreas bem delimitados, notadamente em Minas Gerais (31%), Goiás (18%), Bahia (16%), São Paulo (14%), Mato Grosso (6%) e Rio Grande do Sul (6%) (ANA, 2017). Possuindo um total de 23.181 pivos centrais o que corresponde a 20% da área irrigada total e 30% da área irrigada mecanizada (ANA; EMBRAPA, 2019).

Os pivôs centrais geralmente envolvem um alto investimento inicial, porém requer menos mão de obra de operação e possui custos de aplicação de água menor quando comparado a outros sistemas de aspersão (ORTÍZ *et al.*, 2006; TARJUELO, 2005) sendo, portanto, o sistema de irrigação por aspersão mais comumente usados em áreas maiores que 10 a 15 ha quando não houver restrição como forma, layout, relevo, e tamanho do campo (MONTERO *et al.*, 2013).

2.2. Perdas por evaporação e arraste

Parte da água que é descarregada emissores sofrem influência de variáveis como velocidade do vento, temperatura do ar, radiação, entre outras. As perdas dos sistemas de aspersão são denominadas perdas por evaporação e arraste (PEA) (SARWAR; PETERS; MOHAMED, 2019). A magnitude das PEA depende diretamente do sistema utilizado, condições meteorológicas e condições operacionais do sistema.

Na literatura, valores de PEA já foram reportados numa faixa de 2 a 50% (PLAYÁN *et al.*, 2005) dependendo das condições do sistema de irrigação. Essa variabilidade depende de vários parâmetros operacionais e de projeto, que incluem diâmetro do

bocal, tipo do emissor, sistema de irrigação, pressão, altura do emissor, tempo de duração da irrigação e condições climáticas (AL-GHOBARI *et al.*, 2018).

Entre os fatores de projeto, o emissor com diâmetro do bocal grande, produz gotas com grandes diâmetros, que são mais resistentes à deriva e apresentam menos área por unidade de massa (KELLER; BLIESNER, 1990) sendo a válvula reguladora de pressão peça fundamental também para o diâmetro das gotas. Molle *et al.* (2012) estimaram que cerca de 30 a 50% das perdas são em função da evaporação das gotas enquanto os 50 a 70% restante são em função dos ventos que derivam as gotas para fora da área-alvo. A velocidade do vento é a variável mais atuante quando se trata de uniformidade e PEA. A combinação com outras variáveis como temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar também pode determinar o aumento das PEA (OUAZAA; BURGUETE; ZAPATA, 2016).

Inúmeros estudos já foram conduzidos para a estimativa das PEA para diferentes sistemas de irrigação e condições climáticas. Abo-Ghobar (1992) mediram as PEA no clima deserto da Arábia Saudita em pivôs centrais de baixa pressão e encontraram perdas entre 15 e 36% com velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura do ar como fatores principais que explicam as PEA. McLean; Sri Ranjan & Klassen (2000) estudaram as PEA na região de Manitoba, Canadá, e obtiveram valores abaixo de 3% de perdas em aspersores de impacto e microjato em quatro pivôs centrais diferentes, onde a velocidade do vento, a direção do vento e umidade relativa do ar foram os fatores significativos que afetaram as PEA. Sadeghi *et al.* (2017) estudaram as PEA em Prosser, Washington. As perdas variavam de 8 a 18% em um movimento linear e que a velocidade do vento, temperatura do ar e umidade relativa do ar foram as variáveis que afetaram significativamente as PEA.

Na Tabela 1 são elencados alguns autores e variáveis meteorológicas que influenciam nas PEA.

Tabela 1 - Variáveis que afetam as perdas por evaporação e arraste de acordo com diferentes autores

Autores	Variáveis do sistema					Variáveis meteorológicas					
	D _{bocal}	D _{gotas}	h	P	Vv	T	UR	Δe	R	Eto	
Frost & Shawalen(1960)	-			+	+	+	-	+			
Seginer (1971)					+	+	-		+		
Hermesmeier (1973)			+		+	+	-				
Yazar (1984)				+	+	+		+			
Edling (1985)		-	+		+						
Trimmer (1987)	-			+	+			+			
Keller & Bliesner (1990)	-			+	+					+	
Faci & Bercero (1991)					+						
Tarjuelo (1995)		-			+	+	-				
Silva & James (1988)		-			+	+	-				
Montero (1999)				+	+			+			
Tarjuelo et al. (2000)	-	-	+	+	+			+			
Faci, Salvador & Playán (2001)	-				+	+					
Playán et al. (2004)					+						
Playán et al. (2005)					+						
Ortiz, Tarjuelo & De Juan (2009)					+						
Yacoubi et al. (2010)					+						
Sanchez; Faci & Zapata (2011)					+		+				
Beskow et al. (2011)					+			+			
Colombo et al. (2015)					+						

Variáveis: D_{bocal} – Diâmetro do Bocal, D_{gotas} – Diâmetro de gotas, h – Elevação do bocal, P – Pressão de operação, Vv – Velocidade do vento, T – Temperatura do ar, UR – Umidade relativa do ar, Δe – Déficit de pressão de vapor, R – Radiação solar e Et₀ – Evapotranspiração de referência. + (maior influência nas PEA), - (menor influência nas PEA).

Fonte: Adaptado de Playán et al. (2005)

2.3. Uniformidade de aplicação

Avaliar o desempenho do sistema de irrigação é essencial para o gerenciamento sustentável da água (FARG *et al.*, 2017). A avaliação do desempenho de um pivô central são realizadas a partir da determinação da uniformidade de aplicação, sendo um componente importante da eficiência de aplicação do sistema (MARJANG; MERKLEY; SHABAN, 2012). Heermann & Hein(1968) propuseram um modelo para o

coeficiente de uniformidade em que é considerado a distância do centro do pivô central até o coletor como fator de ponderação para os volumes individuais coletados, dessa forma, explicando a geometria da área irrigada. Esse modelo foi adotado pela ASABE pela Norma 436 (ASABE, 1996) para avaliação de pivôs centrais e sistemas de irrigação por aspersão de movimento linear.

Existem muitos estudos sobre a uniformidade e desempenho da irrigação por aspersão, sendo a uniformidade de aplicação um objetivo central de dimensionamento do projeto (KELLER; BLIESNER, 1990). Diversos fatores podem afetar na uniformidade de aplicação do sistema de irrigação, modelo do emissor, distribuição do sistema, condições climáticas, e o manejo do sistema. Nos modelos dos emissores podem ser considerados o tamanho, tipo, angulação e pressão do emissor. A distribuição do sistema inclui espaçamento dos emissores, espaçamento das linhas laterais, topografia e perdas no sistema hidráulico. As variáveis climáticas como magnitude e direção da velocidade do vento, evaporação de gotas, temperatura do ar e o déficit de pressão de vapor podem impactar na distribuição da lâmina de irrigação sobre a cultura. E nos fatores de manejo destacam-se a inclinação dos emissores e o tempo de operação do sistema (MATEOS, 1998).

A determinação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) (CHRISTIANSEN, 1942) acima do dossel da cultura é o método padrão utilizado para avaliar a variabilidade de água da irrigação na área para fins de projeto e manejo de irrigação (ZAPATA *et al.*, 2018). Rezende *et al.* (2000) observaram que a produção de feijão mudou de acordo com a uniformidade do sistema, apesar de a maior produção não estar ligada diretamente com a maior uniformidade. Li e Rao (2000) analisaram diferentes efeitos de uniformidade de irrigação e não observaram nenhuma diferença significativa na produção de trigo em Pequim (China). Montazar & Sadeghi (2008) observaram que a uniformidade do sistema teve efeito direto na produção de alfafa. Jiménez *et al.* (2010) observaram um grande efeito do CUC na produção de cebola. Brennan (2008) observou uma economia importante na adoção de melhores uniformidades do sistema de irrigação para a produção de alface.

Outro coeficiente bastante utilizado é o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) (CRIDDLE *et al.*, 1956). Este coeficiente é calculado pela razão da média do menor quartil (25%) das lâminas coletadas com a média de todos os valores coletados. Em sistemas de irrigação em maior escala, o CUD apresenta valores menores quando comparado com o CUC.

3. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo geral avaliar a aplicação de água e definir um modelo para a estimativa das perdas por evaporação e arraste em sistema de irrigação por pivô central.

3.1. Objetivos específicos

- Verificar a influência dos elementos meteorológicos sobre a uniformidade de aplicação do pivô central em diferentes horários de funcionamento.
- Determinar as perdas por evaporação e arraste para diferentes emissores em diferentes posições do pivô central e horário de funcionamento.
- Validar diferentes modelos para a estimativa das PEA em sistema de irrigação por pivô central
- Obter a uniformidade de aplicação do pivô central em diferentes horários de funcionamento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido na Fazenda situada no Município de Paula Cândido – MG. As coordenadas geográficas são 20°49'47,77" S e 42°55'07,67" O e altitude de 702 m. De acordo com a classificação climática de Köppen o clima da região é predominantemente tropical, mesotérmico, com verões chuvosos e inverno frio e seco.

4.2. Descrição do sistema de irrigação e estação de bombeamento

O sistema de irrigação utilizado no estudo foi um pivô central Valley modelo 4865-8000-VSL. A distância do vão livre do equipamento até o chão é de 2,74 m. O pivô central é composto por um lance longo com diâmetro de tubulação 6.5/8 de polegadas com comprimento da torre de 55,11 m e com um vão em balanço 4" de diâmetro com 25m de comprimento, em aço galvanizado, totalizando um raio irrigado e área irrigada de 84,56 m e 2,25 ha respectivamente.

O conjunto moto-bomba consiste de uma bomba centrífuga, KSB modelo C-3000 com vazão de $9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e motor WEG trifásico de 2 cv (3500 rpm), situado na casa de bomba que está a 175 metros de distância do centro do pivô central e a dois metros de desnível da base do pivô central. A tubulação de sucção é composta por uma

ampliação excêntrica, 12 metros de tubos de PVC PN 60 de 150mm, uma curva de 90° e uma válvula de pé e crivo. A tubulação de recalque é composta por tubos PVC PN 60 de 100 mm de diâmetro com 175 metros de comprimento.

Para avaliação da velocidade do pivô central, o mesmo teve o percentímetro regulado a 100%. As medições foram realizadas na última torre, cronometrando o tempo gasto para o pivô central percorrer um espaço previamente conhecido por dois pontos, encontrando assim a velocidade média do pivô central.

4.3. Dados dos emissores

Para os ensaios de campo, foram utilizados os emissores Rotator e Orbitor (Figuras 1a e 1b). A disposição dos emissores no pivô central é de acordo com o mapa fornecido pela empresa responsável pelo emissor. Sendo utilizado em ambos os emissores, 18 saídas com cabos flexíveis, contando a partir da terceira posição de emissores. Acoplados entre os emissores e os cabos de saída, utilizou-se uma válvula reguladora de pressão de 10 Psi (Figura 1c), sendo essa a indicada e fornecida pela empresa.

Figura 1 - a) Emissor Rotator. b) Emissor Orbitor. c) Válvula reguladora de pressão de 10 Psi.



Fonte: Autor

4.4. Teste de vazão

A determinação da vazão do emissor (Q), foi realizada pelo método direto com a finalidade de obter uma análise mais detalhada acerca de cada emissor. A coleta do volume de água por emissor foi iniciada após a completa pressurização do sistema, que ocorreu em até 15 minutos após acionamento do sistema. Foi desenvolvido um

dispositivo para as medições em campo. Esse dispositivo é composto por um adaptador que cobriu toda a área do emissor, acoplado a um tubo flexível de quatro metros que descarrega toda a vazão captada para um recipiente graduado de 10 litros e paralelamente cronometrou-se o tempo de enchimento do recipiente permitindo assim o cálculo da vazão de cada emissor. Após a coleta em cada emissor, utilizou-se de uma proveta graduada de 1000 mL para mensuração. Foram realizadas três repetições para cada emissor e a vazão foi calculada conforme a Equação (1):

$$Q_i = \frac{\bar{V}_i * 60}{\bar{\Delta t}} \quad (1)$$

em que

Q_i = Vazão do emissor i, L h⁻¹;

$\bar{V}_i$ = Volume médio coletado no emissor i, L;

$\bar{\Delta t}$ = Tempo médio, minutos.

4.5. Uniformidade de aplicação

As lâminas de irrigação foram coletadas em coletores Fabrimar® de diâmetro 80 mm, espaçados de 1,5 m, formando quatro linhas radiais com 84 m de comprimento com 56 coletores cada, totalizando 220 coletores. Também foram instalados coletores entre essas linhas radiais espaçados de 3,0 m cada, com 84 m de comprimento e com 28 coletores cada (Figura 2). Além das lâminas coletadas, a pressão de entrada e saída da do pivô central foi monitorada, assim como no último emissor.

Figura 2 - Disposição e espaçamento dos coletores no pivô central e posição da casa de bombas.



Fonte: Imagem de Satélite. Autor.

Os ensaios de campo foram realizados afim de possibilitar a estimativa das PEA para os emissores Orbitor e Rotator. Foram realizados testes ligando o sistema em diferentes horários do dia, sendo: as 00h00min, 06h00min, 12h00min e 18h00min. Foi monitorada a pressão no sistema na saída da bomba e no último emissor. Simultaneamente aos ensaios de campo, foram coletados dados meteorológicos a cada minuto a partir de uma estação meteorológica automática Davis ®, modelo Vantage Pro II instalada a 100 m do pivô central.

4.6. Modelagem das perdas por evaporação e arraste

As perdas por evaporação e arraste (PEA), a qual relaciona a lâmina média aplicada durante os ensaios com a lâmina média coletada após os ensaios, foram estimadas conforme equação descrita a seguir:

$$P_{E+A} = 1 - \left(\frac{L_{col}}{L_{aplic}} \right) \quad (2)$$

em que

- P_{E+A} = Perdas por evaporação e arraste, decimal;
 L_{col} = Lâmina média coletada no ensaio de precipitação, mm; e
 L_{aplic} = Lâmina média aplicada no ensaio de precipitação, mm;

Para determinação da L_{aplic} utilizou-se a Equação (3).

$$L_{aplic} = \frac{Q * H}{10 * A} \quad (3)$$

em que

- Q = Vazão de saída do pivô central, $L \text{ s}^{-1}$;
 H = Tempo por volta, horas; e
 A = Área irrigada, ha;

Para determinação da vazão de saída do pivô central, utilizou-se a metodologia descrita no item 4.4.

Para estimativa do modelo de PEA, foi realizado a simulação de quatro modelos de regressão linear simples e múltiplo. Velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor foram as variáveis independentes e as PEA a variável dependente. A Tabela 2 mostra a combinação de variáveis dos modelos gerados.

Tabela 2 - Modelos gerados com os dados climáticos e PEA

Modelo	Variável Independente	Variável Dependente
01	Vv	PEA
02	Vv + T	PEA
03	Vv + T + UR	PEA
04	Vv + T + UR + Δe	PEA

Fonte: Autor

O estudo para identificação das variáveis mais importantes para os modelos de estimativa das perdas por evaporação e arraste pelo vento foi fundamentado pela simulação de diversos modelos de regressão linear múltipla e simples, analisando o coeficiente de determinação R^2 , juntamente com a significância da variável. A partir

daí, foram procedidas análises mais específicas, para se obter as equações preditivas do fenômeno com maiores valores de correlação e significância estatística. O modelo gerado pode ser descrito pela seguinte equação geral:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (4)$$

em que

Y = Variável dependente

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_n$ = Coeficientes da regressão; e

X_1, X_2, X_3, X_n = Variáveis independentes.

Foi utilizado o procedimento recomendado por Pláyan et al. (2005) para selecionar a melhor, mais simples e mais preditiva das equações:

1. As equações serão selecionadas quando as variáveis independentes forem estatisticamente significantes ($P \leq 0,05$);
2. Equações serão descartadas caso apresentem coeficiente de determinação baixo ($R^2 < 0,70$);
3. Critério de simplicidade: As equações que envolvam muitas variáveis independentes só serão aceitas se o coeficiente de determinação (R^2) for significativamente superior em relação a equações com menor variáveis independentes.

Os modelos foram estimados e analisados pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2), juntamente com a significância da(s) variável(eis) dependente(s). As hipóteses testadas são detalhadas a seguir

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

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

4.7. Identidade de modelos

Em uma análise de regressão, frequentemente deseja-se saber se um conjunto de n equações ajustadas são idênticas entre si, ou seja, se o fenômeno representado pelas n equações ajustadas podem ser representado por apenas uma única equação

(DAVIS; HALL, 1996). Diversos métodos de comparação são apresentados pela literatura, destacando-se o método de Identidade de Modelos (GRAYBILL, 1976).

Com a finalidade de testar a igualdade dos modelos apresentados pelos emissores Orbitor e Rotator, procedeu-se o teste de Identidade de Modelos, cujo segue os seguintes passos, descritos por Magalhães & Andrade (2009):

1. Dada as seguintes relações lineares:

$$\begin{aligned} y_{1i} &= \beta_0 + \beta_1 * x_{1i} + \beta_2 * y_{1i} + e_{1i} & i &= 1, \dots, n_1 \\ y_{2i} &= \beta_0 + \beta_1 * x_{2i} + \beta_2 * y_{2i} + e_{2i} & i &= 1, \dots, n_2 \end{aligned}$$

2. Combinam-se todas as $n_1 + n_2$ observações e calcula-se a estimativa de quadrados mínimos de a e b na regressão combinada $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + e$, doravante denominada modelo reduzido. Desta equação obtém-se a soma de quadrados de resíduo (SQR_1) com grau de liberdade igual a $n_1 + n_2 - p$, em que p é o número de parâmetros a ser estimado. Neste caso, $p = 3$.
3. Obtém-se a soma de quadrados de resíduo para as duas equações, ou seja, SQR_2 e SQR_3 , com graus de liberdade $n_1 - p$ e $n_2 - p$, respectivamente. Somam-se estas duas somas de quadrados de resíduo, isto é, $SQR_4 = SQR_2 + SQR_3$ e seus graus de liberdade $n_1 + n_2 - 2p$
4. Obtém-se $SQR_5 = SQR_1 - SQR_4$
5. Calcula-se a estatística F como:

$$F_c = \frac{\frac{SQR_5}{p}}{\frac{SQR_4}{n_1 + n_2 - 2p}} \quad (5)$$

Se $F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$, nível de significância de $\alpha=0,05$, rejeita-se a hipótese de que os parâmetros β_0 's e β_1 's e β_2 's são os mesmos para os dois conjuntos de observações. As hipóteses testadas são detalhadas a seguir

H_0 = Os parâmetros β_0 , β_1 e β_2 das equações são os mesmos para os dois conjuntos observados

H_1 = Não H_0

4.8. Perdas por evaporação e arraste estimada por diferentes modelos

Alguns modelos já foram desenvolvidos para estimativa de PEA, para diversas condições meteorológicas, em diferentes países e para sistemas de irrigação distintos. Neste trabalho foi avaliado a aplicabilidade desses modelos para a cidade de Viçosa-MG. Os modelos avaliados são descritos na Tabela 3:

Tabela 3 - Modelos empíricos propostos para determinação de perdas por evaporação e arraste (PEA)

Autor	Equação	R ²
Dechmi et al. (2003)	PEA = 7,449 + 5,287*Vv	0,81
Playán et al. (2004)	PEA = 1,55 + 1,13*Vv	0,57
Playán et al. (2005)	PEA = 2,7 + 2,31*Vv	0,60
Ortíz et al. (2009)	PEA = 0,95 + 1,91*Vv	0,58
Yacoubi et al. (2010)	PEA = 24,91 + 3,70*Vv – 0,28*UR	0,53
Sanchez et al. (2011)	PEA = 2,835*Vv + 0,433*T	0,93
Colombo et al. (2015)	PEA = -0,2264 + 2,8281*Vv	0,93

Vv – Velocidade do Vento (m s⁻¹), UR – Umidade relativa do ar (%), T – Temperatura do ar (°C).

Fonte: Autor

Os modelos apresentados na Tabela 3 foram utilizados para estimativa das PEA utilizando as variáveis meteorológicas monitoradas neste trabalho. Em seguida, os resultados foram comparados graficamente com as PEA determinadas experimentalmente.

Os resultados de PEA obtidos pelos modelos, também foram analisados estatisticamente pelo índice de desempenho (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997).

O índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT, 1981) é dado pela Equação (6), sendo que o resultado igual a 1 corresponde a concordância perfeita, enquanto o resultado igual a 0 indica nenhuma concordância dos dados.

$$d = 1 - \left[\frac{(\sum (P_i - O_i)^2)}{\sum (|P_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (6)$$

em que

d = Índice de concordância de Willmott (WILLMOTT, 1981),
adimensional;

- P_i = Valores estimados de perdas por evaporação e arraste, decimal;
 O_i = Valores de perdas por evaporação e arraste dos ensaios de campo, decimal e
 $\bar{O}$ = Média dos valores de perdas por evaporação e arraste obtidos por meio dos ensaios de campo, decimal.

O índice de desempenho (c) obtido pelo produto do coeficiente de correlação de Pearson – precisão (r) com o índice de Willmott – exatidão (d) é expresso pela Equação (7).

$$c = r * d \quad (7)$$

O índice de desempenho será avaliado segundo a Tabela 4.

Tabela 4 - Análise de desempenho com base no índice de desempenho

Índice de desempenho	Desempenho
$c > 0,85$	Ótimo
$0,76 \leq c \leq 0,85$	Muito bom
$0,66 \leq c \leq 0,75$	Bom
$0,61 \leq c \leq 0,65$	Mediano
$0,51 \leq c \leq 0,60$	Sufrível
$0,41 \leq c \leq 0,50$	Mau
$c \leq 0,40$	Péssimo

Fonte: Camargo & Sentelhas (1997)

4.9. Análise de uniformidade

Para as análises de uniformidade de irrigação para pivô central, será utilizada a metodologia proposta por (BERNARDO *et al.*, 2019). Cada coletor representa uma área, à medida que se afasta do centro do pivô central, pondera-se os valores coletados. Sendo o fator de ponderação a distância do coletor em relação ao centro do pivô central.

Foram calculados o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) (CHRISTIANSEN, 1942) (8), o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

(CRIDDLE *et al.*, 1956) (9) e Coeficiente de Uniformidade Absoluto (CUA) (KARMELI; KELLER, 1975) (10).

$$CUC = 100 * \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n * \bar{X}} \right) \quad (8)$$

em que

CUC = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, em %;

X_i = Precipitação observada nos coletores, em mm;

$\bar{X}$ = Média das precipitações, em mm e

n = Número de coletores.

De acordo com a classificação de Bernardo *et al.* (2019) recomenda-se os seguintes valores de CUC: a) cultivares com alto valor comercial ou sistema radicular raso: CUC > 90%. b) cultivar extensivo e sistema radicular médio: 80% < CUC < 90%. c) cultivar com sistema radicular profundo: 80% < CUC < 85%.

$$CUD = 100 * \left(\frac{X_{25\%}}{\bar{X}} \right) \quad (9)$$

em que

CUD = Coeficiente de Uniformidade de Distribuição, em %;

$X_{25\%}$ = Média de 25% menores valores do total de coletores, em mm e

$\bar{X}$ = Média das precipitações, em mm.

Para classificação do CUC e CUD utilizou-se a seguinte metodologia de Mantovani (2001) descrita na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação do CUC e CUD, de acordo com a metodologia de Mantovani (2001)

Classificação	CUC (%)	CUD (%)
Excelente	>90	>84
Bom	80 – 90	68 – 84
Razoável	70 – 80	52 – 68
Ruim	60 – 70	36 – 52
Inaceitável	<60	<36

Fonte: Mantovani (2001)

$$CUA = 50 * \left(\frac{X_{25\%}}{\bar{X}} + \frac{\bar{X}}{X_{12,5\%}} \right) \quad (10)$$

em que

- CUA = Coeficiente de Uniformidade Absoluto, em %;
- $X_{25\%}$ = Média de 25% menores valores do total de coletores, em mm;
- $X_{12,5\%}$ = Média de 12,5% maiores valores do total de coletores, em mm e
- $\bar{X}$ = Média das precipitações, em mm.

Para classificação do CUA utilizou a metodologia de Bralts (BRALTS, 1986) descrita na Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação do CUA, de acordo com a metodologia de Bralts (1986)

Classificação	CUA (%)
Excelente	>90
Bom	80 – 90
Regular	70 – 80
Ruim	60 – 70

Fonte: Bralts (1986)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Vazões e lâminas médias coletadas poderadas

Nas Tabelas 7 e 8 estão apresentadas as vazões coletadas dos emissores Orbitor e Rotator, respectivamente.

Tabela 7 – Vazão coletada e vazão de catalogo dos emissores do modelo Orbitor

Posição	Distância (m)	Número do Bocal	Vazão (L h ⁻¹)	
			Coletada	Catálogo
1 - 2				
3	6,3	11	151,89	100
4	8,6			
5	10,9	11	151,32	100
6	13,2			
7	15,5	12	179,78	200
8	17,8			
9	20	13	196,75	200
10	22,3			
11	24,6	15	291,07	300
12	26,9			
13	29,2	16	325,36	300
14	31,5			
15	33,8	17	370,12	400
16	36			
17	38,3	18	398,64	400
18	40,6			
19	42,9	19	456,18	500
20	45,2			
21	47,5	20	489,06	500
22	49,8			
23	52	21	547,67	600
24	54,3			
25	56,7	22	588,46	600
26	59			
27	61,3	23	668,73	700
28	63,6			
29	65,8	24	781,99	800
30	68,1			
31	70,4	25	748,13	800
32	72,7			
33	75	26	871,88	900
34	77,3			
35	79,5	20	538,73	500
36	80,4	22	627,76	600
Vazão total			8.383,5	8.500,0

Fonte: Autor

Tabela 8 - Vazão coletada em nível de campo comparada com a vazão de catalogo dos emissores do modelo Rotator

Posição	Distância (m)	Número do Bocal	Vazão (L h ⁻¹)	
			Coletada	Catálogo
1 - 2				
3	6,3	12	191,20	100
4	8,6			
5	10,9	12	187,64	100
6	13,2			
7	15,5	12	192,64	200
8	17,8			
9	20	13	206,91	200
10	22,3			
11	24,6	15	297,68	300
12	26,9			
13	29,2	16	334,29	300
14	31,5			
15	33,8	17	352,46	400
16	36			
17	38,3	18	411,41	400
18	40,6			
19	42,9	19	444,21	500
20	45,2			
21	47,5	20	498,98	500
22	49,8			
23	52	21	549,20	600
24	54,3			
25	56,7	22	582,84	700
26	59			
27	61,3	23	688,20	700
28	63,6			
29	65,8	24	738,76	800
30	68,1			
31	70,4	25	807,84	800
32	72,7			
33	75	26	848,72	900
34	77,3			
35	79,5	20	500,58	500
36	80,4	22	593,08	600
Vazão Total			8.426,7	8.600,0

Fonte: Autor

Nas Figuras Figura 3 e Figura 4 é possível observar que a vazão dos emissores iniciais superam significativamente a vazão de catálogo e depois os valores se

estabilizam. A grande vazão nos emissores iniciais pode ser explicado pelo mal dimensionamento destes emissores para essa situação. Sendo, portanto, necessário a substituição destes por emissores com uma vazão menor.

Figura 3 - Comparação percentual da vazão coletada com a vazão de catálogo do emissor Orbitor

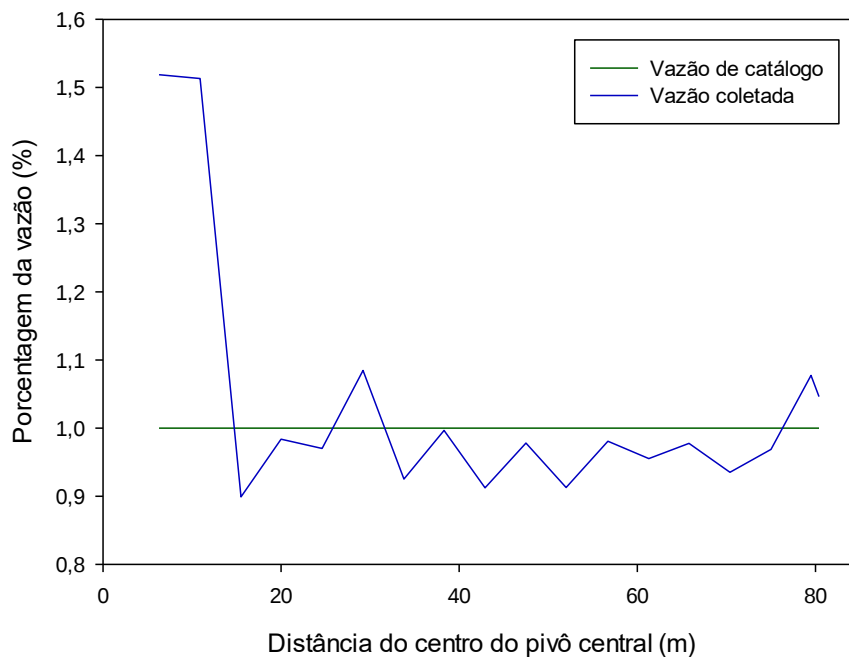
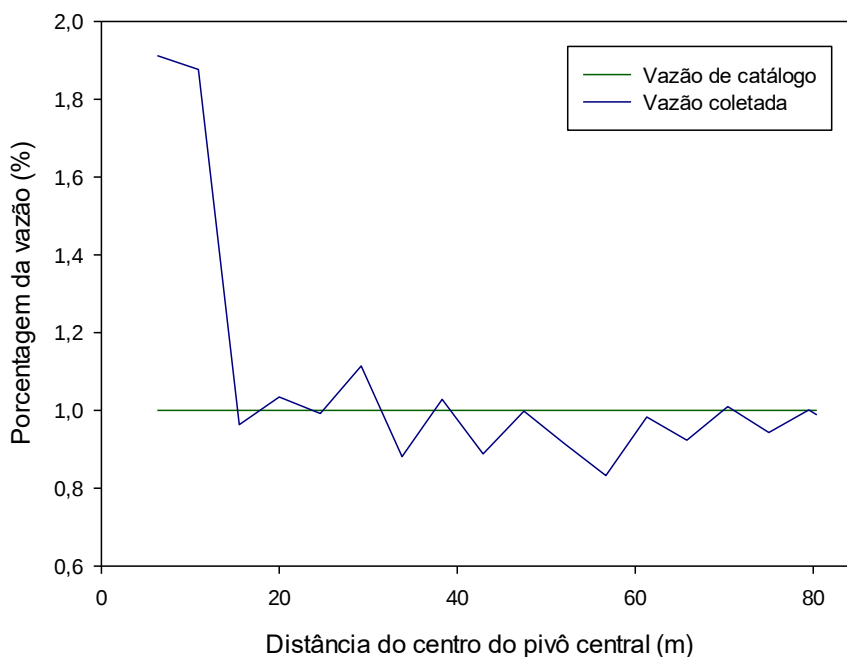


Figura 4 - Comparação percentual da vazão coletada com a vazão de catálogo do emissor Rotator



A vazão total coletada ao longo do pivô central foi inferior a vazão de catálogo em 1,37 e 2,10% para os emissores Orbitor e Rotator, respectivamente. A utilização da

válvula reguladora de pressão adequada para o sistema, pode contribuir para o reduzido valor da diferença entre as vazões totais.

A válvula reguladora de pressão tem como função ajustar uma pressão variável na entrada em uma pressão desejada de saída, independente das variações externas do sistema causados pelas condições hidráulicas e topografia do terreno, aumentando a uniformidade de aplicação de água, melhorar a performance do emissor (MENDOZA; FRIZZONE, 2012)

5.2. Perdas por evaporação e arraste

Estão apresentados nas Tabelas 9 e 10 os resultados obtidos das PEA para os emissores Orbitor e Rotator, respectivamente, juntamente com as variáveis meteorológicas registradas durante os ensaios em diferentes horários, sendo elas, velocidade do vento (V_v), temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR) e déficit de pressão de vapor (Δe).

Tabela 9 - PEA, velocidade do vento (Vv), temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR) e déficit de pressão de vapor (Δe) com o emissor Orbitor operando em diferentes horários.

Data	Vv (m s ⁻¹)	T (°C)	UR (%)	Δe (kPa)	PEA (%)
Horário 00h00min					
10/set	0,00	11,07	88,67	0,15	4,71
11/set	0,00	14,20	86,87	0,21	5,82
13/set	0,00	12,73	87,83	0,18	3,98
14/set	1,08	19,66	81,12	0,43	24,14
15/set	0,12	18,42	84,38	0,33	10,29
Média	0,24	15,21	85,77	0,26	9,79
Horário 06h00min					
04/set	1,37	24,68	46,69	1,66	35,93
09/set	0,60	20,79	77,94	0,55	28,07
11/set	1,44	24,05	54,38	1,38	35,85
12/set	0,73	20,00	78,41	0,50	31,10
13/set	1,01	25,29	53,01	1,70	31,62
Média	1,03	22,96	62,08	1,16	32,51
Horário 12h00min					
04/set	1,35	23,87	65,04	1,04	36,51
06/set	1,35	19,63	68,43	0,72	29,55
09/set	1,23	29,56	35,22	2,68	38,01
11/set	0,89	31,78	30,41	3,26	32,09
12/set	1,36	33,47	26,80	3,78	37,89
Média	1,24	27,66	45,18	2,30	34,81
Horário 18h00min					
09/set	0,89	17,21	78,81	0,42	18,92
10/set	1,03	19,09	69,69	0,69	19,52
12/set	0,99	29,98	33,31	2,83	21,53
13/set	0,68	24,74	59,16	1,28	26,43
14/set	0,54	21,55	66,75	0,86	25,34
Média	0,83	22,52	61,54	1,22	22,35

Fonte: Autor

Tabela 10 - PEA, velocidade do vento (Vv), temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR) e déficit de pressão de vapor (Δe) com o emissor Rotator operando em diferentes horários.

Data	Vv (m s ⁻¹)	T (°C)	UR (%)	Δe kPa	PEA (%)
Horário 00h00min					
15/out	0,00	13,77	89,81	0,16	11,59
16/out	0,05	15,18	87,40	0,22	14,14
17/out	0,01	14,59	79,72	0,34	19,99
18/out	0,05	16,50	84,68	0,29	3,87
19/out	0,05	16,22	83,91	0,30	9,22
Média	0,03	15,25	85,10	0,26	11,76
Horário 06h00min					
16/out	0,73	21,28	62,73	0,99	20,42
17/out	1,49	21,29	60,70	1,01	22,97
18/out	0,60	17,57	83,44	0,33	18,68
19/out	0,51	16,87	80,75	0,38	21,21
20/out	1,01	18,68	79,60	0,45	19,54
Média	0,87	19,14	73,44	0,63	20,56
Horário 12h00min					
16/out	1,06	29,84	32,73	2,83	32,90
17/out	1,26	29,52	35,06	2,68	33,80
18/out	1,25	21,74	66,92	0,86	32,81
19/out	1,40	24,68	52,22	1,48	32,37
20/out	1,40	26,46	51,39	1,68	32,15
Média	1,28	26,45	47,66	1,91	32,81
Horário 18h00min					
15/out	1,17	20,56	77,91	0,54	21,14
16/out	0,25	27,93	36,69	2,40	20,49
17/out	0,59	18,87	69,71	0,68	22,81
18/out	0,81	18,64	79,03	0,45	20,86
19/out	0,13	17,73	75,92	0,49	21,32
Média	0,59	20,75	67,85	0,91	21,32

Fonte: Autor

De acordo com as Tabelas 9 e 10 é possível identificar que para ambos os emissores, os menores e maiores valores de PEA foi observado quando o sistema foi ligado as 00h00min e 12h00min, respectivamente. A variação percentual dos valores de PEA entre os emissores são de 16,75, 36,75, 5,74 e 4,60% para os horários 00h00min, 06h00min, 12h00min e 18h00min, respectivamente.

As amplitudes das variáveis meteorológicas, PEA e lâmina coletada (L_{colet}) do emissor Orbitor são descritas na Tabela 11. Os ensaios apresentaram valores de velocidade do vento entre 0,0 e 7,1 m s⁻¹, com um valor médio de 0,80 m s⁻¹. A

umidade relativa do ar variou de 24 a 90% durante as avaliações, com um valor médio de 63,65%. A temperatura do ar variou entre 10,1 e 34,2 °C, com um valor médio de 22,1 °C. E os resultados das PEA variaram de 3,98 a 38,01%, com um valor médio de 24,87%.

Tabela 11 - Valores máximos, mínimos e médios das PEA, condições atmosféricas observados e lâmina coletada para o emissor Orbitador

Variável	Amplitude	Máximo	Mínimo	Médio
PEA (%)	34,03	38,01	3,98	24,87
Vv (m s ⁻¹)	7,10	7,10	0,00	0,80
UR (%)	66,00	90,00	24,00	63,65
T (°C)	24,10	34,20	10,10	22,10
Δe (kPa)	3,90	4,00	0,10	1,25
L _{colet} (mm)	0,52	1,05	0,53	0,81

Velocidade do Vento – Vv, Temperatura do ar – T, Umidade relativa do ar – UR, Perdas por evaporação e arraste – PEA, Lâmina coletada – L_{colet}.

Fonte: Autor

Na Tabela 12 é apresentados as amplitudes das variáveis meteorológicas, PEA e lâmina coletada (L_{colet}) do emissor Rotator. Os ensaios apresentaram velocidades do vento entre 0,0 e 3,6 m s⁻¹, com um valor médio de 0,70 m s⁻¹. A umidade relativa do ar variou de 30 a 91% durante as avaliações, com um valor médio de 68,53%. A temperatura do ar manteve-se entre 12,7 e 30,7 °C, com um valor médio de 20,38 °C. E os resultados das PEA variaram de 3,87 a 33,80%, com um valor médio de 21,61%.

Tabela 12 - Valores máximos, mínimos e médios das PEA, condições atmosféricas observados e lâmina coletada para o emissor Rotator

Variável	Amplitude	Máximo	Mínimo	Médio
PEA (%)	29,93	33,80	3,87	21,61
Vv (m/s)	3,60	3,60	0,00	0,70
UR (%)	61,00	91,00	30,00	68,53
T (°C)	18,00	30,70	12,70	20,38
Δe (kPa)	3,00	3,10	0,10	0,93
L _{colet} (mm)	0,53	1,11	0,58	0,85

Velocidade do Vento – Vv, Temperatura do ar – T, Umidade relativa do ar – UR, Perdas por evaporação e arraste – PEA, Lâmina coletada – L_{colet}.

Fonte: Autor

Correia *et al.* (2020) e INMET (2019) observaram valores dos elementos meteorológicos, para a cidade de Viçosa, Minas Gerais, próximos aos deste estudo. Os autores reportaram temperatura do ar entre 17 e 28 °C. Fialho & Quina *et al.* (2017)

observaram temperaturas do ar, para a cidade de Viçosa, Minas Gerais, em torno de 21 °C. Lourenço (2018) observou temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento próximos a 23 °C, 59% e 1,7 m s⁻¹, respectivamente. Valores obtidos pela estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia – Inmet, localizada na cidade de Viçosa, Minas Gerais, apresentaram características climáticas próximas a deste estudo. Os dados indicam um padrão nas condições climáticas da região, sendo característico também da cidade de Paula Candido, Minas Gerais.

As PEA observadas neste trabalho foram próximos dos observados por Dechmi *et al.* (2003) que, para as condições climáticas de Zaragoza, Espanha obtiveram valores de PEA variando entre 8,1 e 39,6%, com valor médio de 19,9%. Porém velocidade do vento e a lâmina coletada foi superior a observada neste trabalho, indicando que outros elementos meteorológicos podem explicar as PEA para as condições de Viçosa, Minas Gerais.

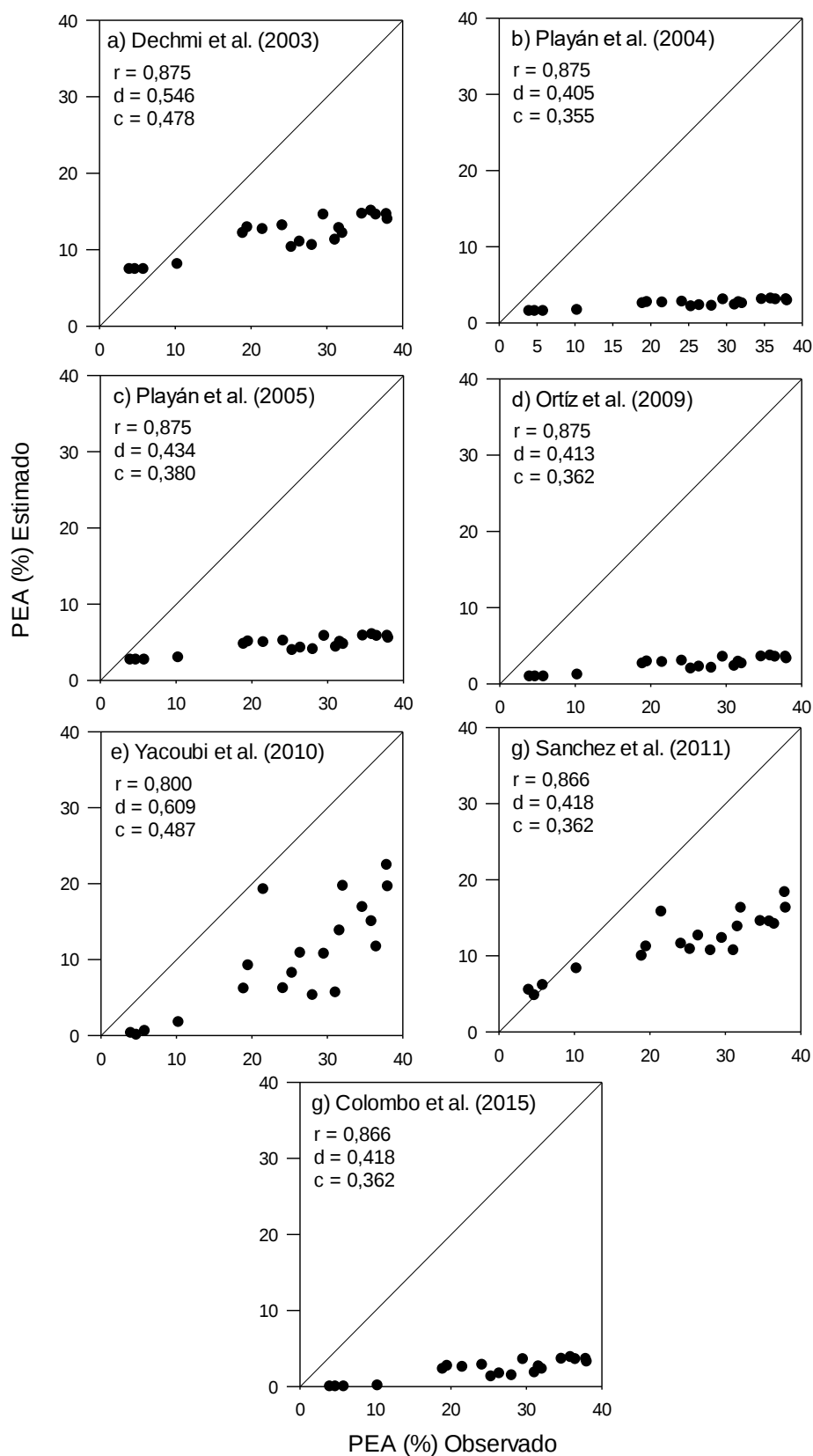
Ortiz *et al.* (2009) determinaram as PEA nos horários diurnos e noturnos com emissores em diferentes alturas em Albacete, Espanha. As menores PEA foram observadas nos horários noturnos e com menor altura referente ao solo. Segundo Ortiz *et al.* (2009) era esperado que as menores PEA fossem obtidas nestas condições, considerando que a noite os horários de velocidade do vento e temperatura do ar são menores quando comparado aos horários diurnos. Os autores também relatam que quanto maior a distância do emissor do solo, as partículas de água ficam mais tempo em contato com o ar, sendo mais suscetível às PEA. A altura dos emissores deste trabalho era de 2,00 m, propiciando para os que as PEA fossem superiores as observadas por outros autores.

De acordo com Playán *et al.* (2005), as PEA são menores em horários noturnos, indicando que a temperatura do ar pode melhor explicar as PEA em experimentos realizados durante o dia, tendo maior influência nesses horários, corroborando com os resultados obtidos neste trabalho e por Ortiz *et al.* (2009).

5.3. Perdas por evaporação e arraste estimadas por diferentes modelos

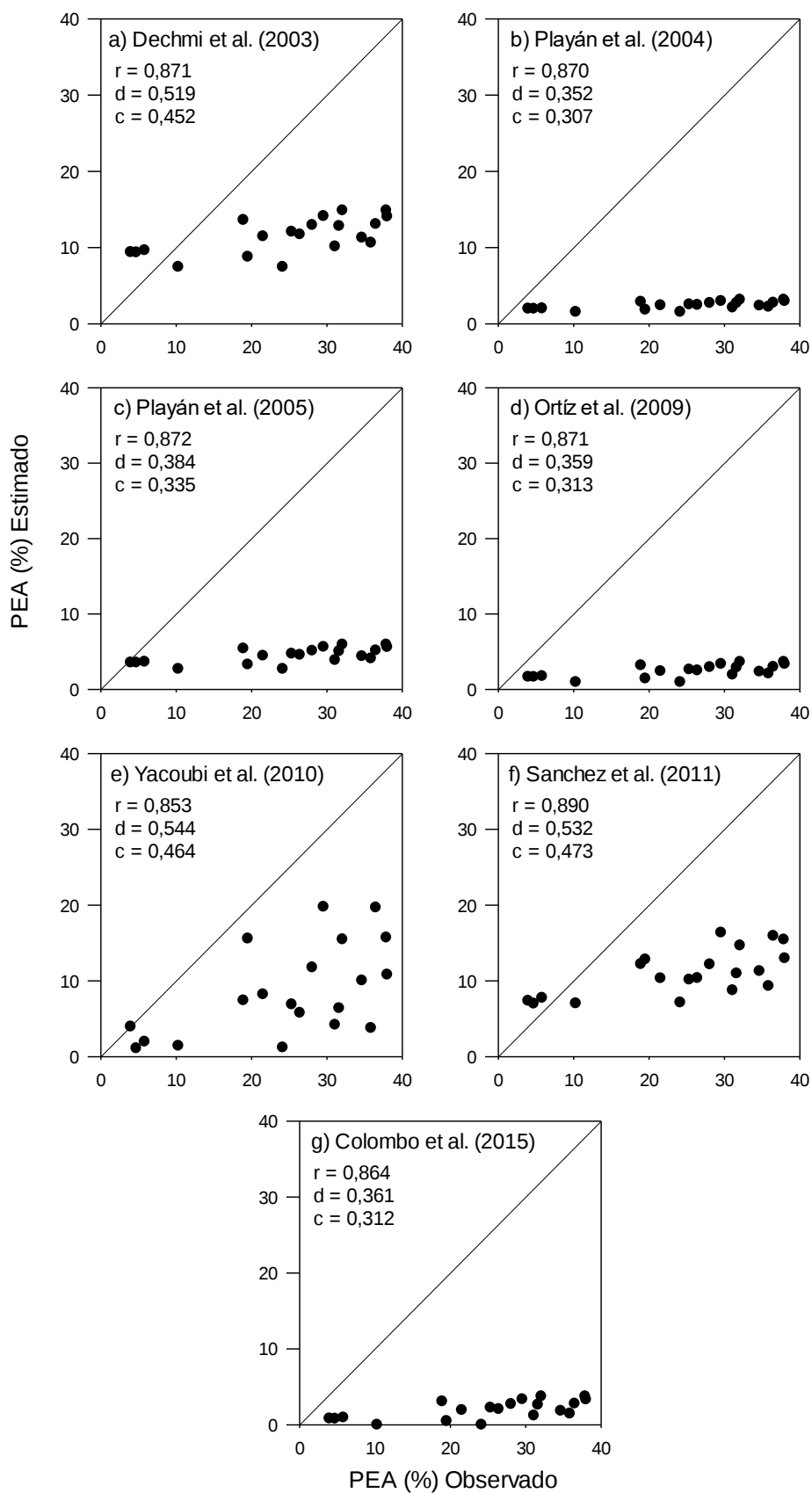
As Figuras 5 e 6 comparam os valores observados do emissor Orbitor e Rotator, respectivamente, com os valores estimados por diferentes modelos publicados. Essas análises foram conduzidas a fim de verificar a aplicabilidade desses modelos para os emissores e as condições meteorológicas de Paula Cândido-MG.

Figura 5 - Resultado das PEA Observadas do aspersor Orbitor em função das PEA Estimada por outros modelos



r – índice de correlação, d – índice de concordância e c – índice de desempenho.
Fonte: Autor

Figura 6 - Resultado das PEA Observadas do aspersor Rotator em função das PEA Estimada por outros modelos



r – índice de correlação, d – índice de concordância e c – índice de desempenho.

Fonte: Autor

O primeiro modelo analisado nesse estudo, Dechmi *et al.* (2003), foi considerado “mau” índice de desempenho para ambos os emissores. As Figuras 5a e 6a a indicam que os menores valores de PEA estimadas pelo modelo de Dechmi *et al.* (2003) se aproximaram da reta 1:1, indicando similaridade entre os dados observados e estimados quando a velocidade do vento é baixa. Porém os maiores valores de PEA se distanciam da reta 1:1 indicando divergência entre os dados obtidos no modelo testado.

Dechmi *et al.* (2003) registraram valores de PEA variando de 36,9 e 6,0% sendo a velocidade do vento a única variável explicativa estatisticamente. O local de estudo apresentava média de velocidade do vento de $2,4 \text{ m s}^{-1}$ e temperatura do ar variando entre 20,6 e 8,5°C. Dechmi *et al.* (2003) destacam que o modelo é pouco eficiente quando utilizado em situações de baixa velocidade do vento. O presente estudo observou média de velocidade do vento de $0,75 \text{ m s}^{-1}$, o que pode ter influenciado na subestimação das PEA. A temperatura do ar variaram de 34,1 e 10,1 °C, sendo ela superior a observada por Dechmi *et al.* (2003) o que também pode ter auxiliado na subestimação dos dados.

O modelo de Dechmi *et al.* (2003) foi desenvolvido utilizando um sistema de irrigação por aspersão convencional em Zaragoza – Espanha, o qual apresenta configurações, características específicas do equipamento e condições climáticas diferentes dos utilizados nesse estudo.

No sistema de irrigação por aspersão convencional, os emissores ficam suspensos por meio de tubos de elevação a uma altura fixa, os mesmos ficam posicionados sempre na mesma posição durante todo o tempo de irrigação da cultura. Isso se difere do sistema de irrigação por pivô central em que os aspersores ficam suspensos por tubos de descida e se deslocam radialmente por toda a área a ser irrigada. Nesse sentido, a subestimativa dos valores de PEA pelo modelo de Dechmi *et al.* (2003), pode ser justificada também pelas diferenças entre os sistemas de irrigação utilizado.

Playán *et al.* (2005), Manke *et al.* (2019) e Lourenço (2018) simularam as PEA por meio do modelo desenvolvido por Dechmi *et al.* (2003). Playán *et al.* (2005) utilizaram uma máquina experimental que simula um sistema de irrigação do tipo lateral móvel. Manke *et al.* (2019) utilizaram em seu experimento um sistema de irrigação do tipo lateral móvel com 275 m de comprimento dividido em 5 lances. No estudo de Lourenço (2018) foi utilizado um sistema de pivô central com raio molhado de 87 m.

Playán *et al.* (2005) e Manke *et al.* (2019), observaram resultados semelhantes a este trabalho, ambos obtiveram um “mau” desempenho do modelo. As razões para este baixo desempenho são justificadas por ambos os autores, pelas particularidades do sistema de irrigação utilizado por Dechmi *et al.* (2003). Playán *et al.* (2005) também considera os erros de medição como sendo um dos fatores para o “mau” desempenho do modelo. Os resultados obtidos por Lourenço (2018) apresentaram um “bom” índice de desempenho para o modelo, divergindo deste trabalho.

O modelo proposto por Playán *et al.* (2004) também subestimou os valores de PEA, em relação aos obtidos por esse trabalho, sendo o seu desempenho classificado como “péssimo” para ambos os emissores, de acordo com o índice de desempenho como mostra as Figuras 5b e 6b.

Playán *et al.* (2004) avaliaram uma máquina experimental que simula um sistema de irrigação por pivô central em Zaragoza – Espanha. Os autores registraram valores de PEA entre 0,6 e 8,3% e de velocidade do vento entre 0,19 e 4,50 m s⁻¹, sendo ela a única variável independente significativa estatisticamente. De acordo com as Tabelas 11 e 12, a velocidade do vento variou de 0 a 7,10 m s⁻¹, registrando PEA entre 3,87 e 38,01%, sugerindo que a diferença das condições climáticas entre as regiões estudadas podem ter sido um dos fatores para a subestimação dos dados de PEA.

Resultados semelhantes foram obtidos por Colombo *et al.* (2015), Lourenço (2018), Manke *et al.* (2019) e Playán *et al.* (2005) que simularam as PEA por meio do modelo de Playán *et al.* (2004) e obtiveram um desempenho ruim em todos os casos. Colombo *et al.* (2015) estudou a influência das variáveis climáticas em emissores spray de placa oscilante em pivô central com raio molhado de 432,57 m composto por quatro lances longos e quatro lances médios e vão em balanço. Colombo *et al.* (2015), Lourenço (2018), Manke *et al.* (2019) e Playán *et al.* (2005) também afirmam que as limitações do modelo de Playán *et al.* (2004) podem ser atribuídas ao fato que o modelo foi gerado a partir de uma máquina experimental que simula um equipamento de irrigação o que operou em condições diferentes das analisadas.

Playán *et al.* (2005) caracterizou as PEA em uma máquina experimental que simula um sistema de irrigação do tipo lateral móvel. Esse sistema se diferencia do pivô central por ter uma mobilidade linear transversal sobre toda a área a ser irrigada.

As PEA foram subestimadas pelo modelo de Playán *et al.* (2005) para ambos os emissores, sendo o desempenho do modelo classificado como “péssimo” (Figura 5c e 6c). Os autores utilizaram uma máquina experimental que simula um sistema de

irrigação do tipo lateral móvel para modelagem de PEA nos períodos do dia e noite em Zaragoza – Espanha. Por se tratar de uma máquina experimental, a mesma apresenta características específicas, como o fato de não possuir torres autopropelidas ao longo da sua estrutura, fazendo com que o equipamento funcione como um vão em balanço, divergindo do sistema lateral móvel.

As PEA observadas variaram entre 1,2 e 14,7%. Playán *et al.* (2005) afirma que a velocidade do vento foi a variável mais atuante nas PEA, seguida pela umidade relativa do ar. Radiação solar e temperatura do ar tiveram uma baixa performance para explicação dos dados de PEA. Neste trabalho, a velocidade do vento e a temperatura do ar foram as variáveis atuantes nas PEA, sendo as diferenças climáticas entre os locais estudados e os sistemas de irrigação a causa da subestimação dos dados deste estudo.

O modelo de Playán *et al.* (2005) foi simulado por Beskow *et al.* (2011), Colombo *et al.* (2015), Lourenço (2018) e Manke *et al.* (2019). Beskow *et al.* (2011) analisou as PEA em um sistema de irrigação por aspersão convencional com aspersores de média pressão. Beskow *et al.* (2011), Colombo *et al.* (2015), Lourenço (2018) obtiveram resultados semelhantes com este estudo, observando resultados classificados como “péssimo” e “sofrível” para o modelo. Beskow *et al.* (2011) atribuíram o “péssimo” desempenho ao diâmetro de bocais distinto, o que acarreta em diferentes pulverizações de gotas e, conseqüentemente, diferentes perdas por evaporação e arraste (BESKOW *et al.*, 2008; ZAZUETA, 2011). Colombo *et al.* (2015), Lourenço (2018) atribuíram o desempenho “sofrível” ao modelo experimental de irrigação utilizado por Playán *et al.* (2005). Manke *et al.* (2019) obtiveram um “bom” desempenho para o modelo. A máquina experimental utilizado por Playán *et al.* (2005) é similar com o equipamento utilizado por Manke *et al.* (2019) e a variação da velocidade do vento para ambos os estudos foram próximas, podendo essas serem as razões para o bom desempenho do modelo.

O modelo gerado por Ortiz *et al.* (2009) também subestimou as PEA, sendo o índice de desempenho classificado como “péssimo”, como mostrado nas Figuras 5d e 6d. Ortiz *et al.* (2009) caracterizou as PEA de um pivô central para dois emissores distintos e duas alturas dos emissores acima do solo para as condições climáticas de Albacete – Espanha.

No equipamento de irrigação de Ortiz *et al.* (2009) foram instalados emissores do tipo spray de placa defletora rotativa oscilante. Os autores também identificaram que

a variável independente explicativa foi a velocidade do vento, enquanto a do presente trabalho, a temperatura do ar também foi significativa estatisticamente. Sendo as diferenças climáticas de ambos os locais, um indicativo da subestimação dos valores de PEA.

O experimento de Ortiz *et al.* (2009) avaliou o pivô central com emissor a 1,0 m da superfície, menor que a utilizada neste trabalho. A altura do emissor influencia nas PEA, pois quanto maior for sua altura, maior será a trajetória das gotas até a superfície do solo, conseqüentemente aumentando o tempo em que as gotas chegaram até o solo, sendo mais suscetíveis as variáveis meteorológicas. Podendo ser também, um dos fatores que influenciou nas maiores PEA observadas por este trabalho.

Colombo *et al.* (2015), Lourenço (2018) e Manke *et al.* (2019) simularam as PEA pelo modelo de Ortiz *et al.* (2009) e obtiveram resultados variáveis. Colombo *et al.* (2015) observaram valores “medianos” para o modelo, atribuindo o resultado as condições operacionais do sistema sendo mais próximas ao seu estudo. Os resultados de Colombo *et al.* (2015) divergiram deste, mesmo em ambos o sistema de irrigação sendo o mesmo. Lourenço (2018) e Manke *et al.* (2019) observaram resultados “sofribéis” em seus estudos. Esses pesquisadores atribuíram os resultados obtidos às diferenças climáticas dos locais estudados. Manke *et al.* (2019) ainda afirma que a diferença de altura dos emissores, podem ter contribuído para a subestimação dos resultados.

Yacoubi *et al.* (2010) avaliaram as PEA diurnas e noturnas em um sistema de irrigação por aspersão convencional na região de Aritana – Tunísia. O resultado a simulação do modelo apresentou classificação “mau” pelo índice de desempenho, como mostra as Figuras 5e e 6e. Os autores observaram valores de PEA entre 6 e 46%, enquanto a velocidade do vento variou de 0,5 e 6,1 m s⁻¹, com um valor médio de 2,2 m s⁻¹. A temperatura do ar ficou entre 16 e 44°C, com um valor médio de 29,5°C e a umidade relativa do ar entre 15 e 83% com um valor médio de 49%. As variáveis meteorológicas observadas por Yacoubi *et al.* (2010) foram próximas as observadas neste trabalho (Tabelas 11 e 12). Para ambos os emissores, o desempenho foi considerado “mau”, pelo índice de desempenho. As diferenças no sistema de irrigação podem explicar o mau desempenho do modelo com os dados observados.

As PEA também foram simuladas por Lourenço (2018) e Manke *et al.* (2019) pelo modelo proposto por Yacoubi *et al.* (2010) e obtiveram desempenhos classificados como “bom”. Manke *et al.* (2019) atribuíram os resultados ao intervalo de variação da

velocidade do vento, que foi próxima em ambos os estudos. Indicando dessa forma, que a velocidade do vento foi o fator mais atuante e proporcionou um ajuste adequado das PEA.

O modelo proposto por Sanchez *et al.* (2011) subestimou os valores de PEA observados, com um índice de desempenho classificado como “péssimo” (Figuras 5f e 6f). Nos estudos de Sanchez *et al.* (2011) foram avaliados emissores de um sistema de irrigação por aspersão convencional, o qual apresenta configurações e características distintas dos usados neste trabalho. As diferenças entre ambos os sistemas de irrigação, podem ter contribuído para a subestimação das PEA.

As variáveis significativas do trabalho de Sanchez *et al.* (2011), foram velocidade do vento e temperatura do ar, o mesmo observado neste trabalho. A temperatura do ar observada pelos autores variou de 5,6 e 27,1°C com um valor médio de 16°C, enquanto as deste trabalho os valores médios para os emissores Orbitor e Rotator foram 22,10 e 20,38°C, respectivamente, podendo ser um dos fatores que influenciou na subestimativa dos valores estimados pelo modelo de Sanchez *et al.* (2011). Vale salientar que as condições climáticas dos experimentos realizados por Sanchez *et al.* (2011) são diferentes deste trabalho, podendo estes fatos também terem contribuído para a subestimação do modelo.

O modelo de Sanchez *et al.* (2011) foi testado por Lourenço (2018) e Manke *et al.* (2019). Lourenço (2018) obtiveram valores satisfatórios para a simulação do modelo de Sanchez *et al.* (2011), sendo classificado como “bom”. Manke *et al.* (2019) quando simulou os valores com base no modelo de Sanchez *et al.* (2011), perceberam uma superestimação das PEA, sendo classificado como “mediano”. De acordo com Manke *et al.* (2019), a superestimação dos valores se deu pela diferença do sistema de irrigação utilizado e pela pressão do sistema utilizada por Sanchez *et al.* (2011). Enquanto Manke *et al.* (2019) utilizou válvulas reguladoras de pressão de 68,9 kPa (10 Psi), Sanchez *et al.* (2011) estudou o efeito de válvulas reguladoras de pressão de 240 kPa (34,8 Psi), 320 kPa (46,4 Psi) e 420 kPa (60,9 Psi). Neste contexto, segundo Montero *et al.* (2003) o aumento da pressão de serviço do aspersor eleva a velocidade do jato de água, proporcionando o aumento da fricção com o ar, causando gotas de menor diâmetro, que sofrerão mais facilmente os efeitos das PEA.

Colombo *et al.* (2015) desenvolveram um modelo para as PEA de um emissor tipo spray de placa oscilante em um pivô central em Bom Sucesso, MG (BR). Os valores de PEA pelo modelo de Colombo *et al.* (2015) foram subestimados em relação aos

valores obtidos nos ensaios de campo, sendo classificado como “péssimo” para ambos os emissores, como visto nas Figuras 5g e 6g.

O pivô central utilizado por Colombo *et al.* (2015) possui um total de oito lances e vão em balanço, e um raio total de 432,57 m. O pivô central utilizado neste estudo, conta apenas com um lance e vão em balanço, totalizando um raio de 84,57 m. A lâmina média coletada por Colombo *et al.* (2015) ficou entorno de 6,9 mm, enquanto o deste estudo 0,83 mm. Podendo essas diferenças ter influenciado para que os valores observados de PEA sejam superiores aos valores estimados pelo modelo.

Os emissores utilizados por Colombo *et al.* (2015) foram espaçados entre si de 2,30 m, enquanto o deste estudo foi espaçado entre 4,6 m. Segundo Ortega *et al.* (2000), o espaçamento dos emissores influencia nas PEA. Quanto menor for o espaçamento, cria-se um microclima favorável no local irrigado, o que diminui as PEA, quando comparado com emissores mais espaçados entre si. Dessa forma, o menor espaçamento no trabalho de Colombo *et al.* (2015) e, conseqüentemente, maior número de emissores, proporcionou um microclima favorável, o que pode ter diminuído as PEA e subestimado os valores estimados pelo modelo.

Manke *et al.* (2019) simulou o modelo de Colombo *et al.* (2015) obtendo uma correlação classificada como “mediana”. Manke *et al.* (2019) atribuíram os resultados as diferenças climáticas entre as regiões e o diferente sistema de irrigação utilizado nos estudos. De acordo com Lourenço (2018) os resultados da simulação dos valores de Colombo *et al.* (2015) performaram “mau” devido ao baixo número de repetições utilizados pelos autores, sendo apenas 12 observações diurnas e baixa velocidade do vento.

5.4. Modelo proposto para estimativa das perdas por evaporação e arraste do sistema

No item 5.3, os resultados apresentados por diferentes modelos, nos permitiram concluir que os dados desenvolvidos por outros autores em diferentes regiões, equipamentos de irrigação, condições climáticas e aspersores distintos não representaram bem os resultados obtidos por esse estudo.

Portanto, devido a inexistência de um modelo para a estimativa de PEA para os emissores Orbitor e Rotator nas condições climáticas de Paula Cândido – MG, desenvolveu-se uma equação a partir dos dados obtidos nos ensaios de campo.

5.4.1. Orbitor

Nas Tabelas 13, 14, 15 e 16 são apresentados os resumos dos modelos desenvolvidos, com os coeficientes gerados, erro padrão teste t de Student, p-valor e coeficiente de determinação (R^2). O coeficiente de determinação se mostrou satisfatórios ($R^2 = 0,7548$ a $R^2 = 0,8491$) em todos os modelos desenvolvidos, podendo qualquer modelo ser selecionado com base neste critério. Observou-se que as únicas variáveis independentes significativas pelo teste t de Student ($p < 0,05$) foram a “velocidade do vento” e “temperatura do ar”. Apenas os modelos 01 e 02 respeitam o primeiro critério recomendado por Pláyan et al. (2005), sendo, portanto, o modelo 02 selecionado por apresentar o coeficiente de determinação (R^2) maior.

Tabela 13 - Resumo referente ao modelo 01 com os coeficientes β_0 e β_1 , erro padrão, teste t de Student e p-valor

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	8,158	2,496	3,268	0,004*
Velocidade do Vento	20,057	2,600	7,713	<0,001*
$R^2 = 0,7548$				

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

Tabela 14 - Resumo referente ao modelo 02 com os coeficientes β_0 , β_1 e β_2 , erro padrão, teste t de Student e p-valor

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	-1,809	4,247	-0,426	0,67
Velocidade do Vento	14,452	3,039	4,754	<0,001*
Temperatura do ar	0,662	0,244	2,719	0,014*
$R^2 = 0,8191$				

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

Tabela 15 - Resumo referente ao modelo 03 com os coeficientes β_0 , β_1 , β_2 e β_3 erro padrão, teste t de Student e p-valor

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	-44,150	22,633	-1,951	0,069
Velocidade do Vento	14,689	2,833	5,185	<0,001*
Temperatura do ar	1,658	0,571	2,904	0,010*
Umidade Relativa do ar	0,316	0,166	1,900	0,075
$R^2 = 0,8491$				

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

Tabela 16 - Resumo referente ao modelo 04 com os coeficientes β_0 , β_1 , β_2 , β_3 e β_4 erro padrão, teste t de Student e p-valor

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	-21,415	29,325	-0,730	0,476
Velocidade do Vento	12,264	3,453	3,552	<0,001*
Temperatura do ar	1,880	0,593	3,169	0,006*
Umidade Relativa do ar	0,029	0,290	0,102	0,920
Déficit de Pressão	-5,964	4,986	-1,196	0,250
$R^2 = 0,8473$				

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

O modelo gerado é uma regressão linear múltipla, com duas variáveis independentes para a variável dependente (PEA). Na Equação (11) é mostrado o modelo selecionado para estimativa das PEA gerado para o emissor Orbitor para as condições meteorológicas de Paula Cândido – MG.

$$PEA = -1,809 + 14,452 * V_v + 0,662 * T \quad (11)$$

em que

PEA = Perdas por evaporação e arraste, em %;

V_v = Velocidade do vento, $m s^{-1}$ e

T = Temperatura do ar, °C.

A Tabela 17 mostra a análise de variância – (ANOVA) do modelo selecionado. A partir da ANOVA observa-se que para ambas as variáveis independentes o F calculado foi superior ao F tabelado ($F_{tab} = 4,45$), confirmando a rejeição da hipótese nula, H_0 , a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, indicando que as variáveis independentes (velocidade do vento e temperatura do ar) exercem influência na variável dependente (PEA).

Tabela 17 - Análise de Variância para o modelo selecionado do emissor Orbitor

	GL	SQ	QM	F	P
Velocidade do Vento	1	1.831,66	1.831,66	80,6131	<0,001*
Temperatura do ar	1	167,94	167,94	7,3911	0,015*
Resíduo	17	386,27	22,72		
Total	19	2.385,87	2.022,32		

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

5.4.2. Rotator

O procedimento para seleção do modelo de PEA para o emissor Rotator foi igual ao utilizado para o emissor Orbitor. As Tabelas 18, 19, 20 e 21 mostram o resumo dos modelos, com os coeficientes gerados, erro padrão, teste t de Student, p-valor e coeficiente de determinação (R^2). Os coeficientes de determinação se mostraram satisfatórios ($R^2 = 0,7456$ a $R^2 = 0,8768$) em todos os modelos, assim como no emissor Orbitor, sendo possível selecionar qualquer dos modelos baseado neste critério.

A velocidade do vento, se mostrou significativa ($p < 0,05$) em todos os modelos testados. No modelo 03 a temperatura do ar não foi significativa ($p < 0,05$) e no modelo 04 a temperatura do ar, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor não foram significativas ($p < 0,05$), sendo, portanto, ambos os modelos descartados, de acordo com o primeiro critério recomendado por Pláyan et al. (2005). Apenas os modelos 01 e 02 respeitam o primeiro critério recomendado por Pláyan et al. (2005), sendo o modelo 02 selecionado por apresentar coeficiente de determinação (R^2) maior, assim como observado no emissor Orbitor.

Tabela 18 - Resumo referente ao modelo 01 com os coeficientes β_0 e β_1 , erro padrão, teste t de Student e p-valor

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	9,209	1,889	4,875	<0,001*
Velocidade do Vento	16,258	2,160	7,528	<0,001*
$R^2 = 0,7456$				

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

Tabela 19 - Resumo referente ao modelo 02 com os coeficientes β_0 , β_1 e β_2 erro padrão, teste t de Student e p-valor

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	-0,317	3,355	-0,094	0,926
Velocidade do Vento	12,085	2,190	5,519	<0,001*
Temperatura do ar	0,623	0,195	3,194	0,005*
$R^2 = 0,8316$				

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

Tabela 20 - Resumo referente ao modelo 03 com os coeficientes β_0 , β_1 , β_2 e β_3 erro padrão, teste t de Student e p-valor

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	60,810	22,910	2,654	0,018*
Velocidade do Vento	14,109	2,019	6,989	<0,001*
Temperatura do ar	-1,012	0,631	-1,605	0,128
Umidade Relativa do ar	-0,428	0,159	-2,689	0,016*
$R^2 = 0,8768$				

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

Tabela 21 - Resumo referente ao modelo 04 com os coeficientes β_0 , β_1 , β_2 , β_3 e β_4 erro padrão, teste t de Student e p-valor

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t	P
Constante	54,796	24,840	2,209	0,043*
Velocidade do Vento	14,936	2,373	6,294	<0,001*
Temperatura do ar	-1,263	0,736	-1,717	0,107
Umidade Relativa do ar	-0,322	0,222	-1,453	1,167
Déficit de Pressão	3,548	5,098	0,696	0,497
$R^2 = 0,8727$				

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

A Tabela 22 mostra a análise de variância – ANOVA do modelo selecionado. A partir da ANOVA observa-se que para ambas as variáveis independentes o F calculado foi superior ao F tabelado ($F_{\text{tab}} = 4,45$), confirmando a rejeição da hipótese nula, H_0 , a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, indicando que as variáveis independentes (velocidade do vento e temperatura do ar) exercem influência na variável dependente (PEA).

Tabela 22 - Análise de Variância para o modelo selecionado do emissor Rotator

	GL	SQ	QM	F	P
Velocidade do Vento	1	967,89	967,89	85,642	<0,001*
Temperatura do ar	1	115,26	115,26	10,198	0,005*
Resíduo	17	192,13	11,30		
Total	19	1.275,28	1.094,45		

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

O modelo gerado é uma regressão linear múltipla, com duas variáveis independentes (velocidade do vento e temperatura do ar) e uma dependente (PEA). Na Equação (12) está o modelo para estimativa das PEA gerado para o emissor Rotator para as condições meteorológicas de Paula Cândido – MG.

$$PEA = -0,317 + 12,085 * V_v + 0,623 * T \quad (12)$$

em que

PEA = Perdas por evaporação e arraste, em %;

V_v = Velocidade do vento, $m\ s^{-1}$ e

T = Temperatura do ar, °C.

Playán *et al.* (2005) realizaram experimento com uma máquina experimental que simula uma irrigação do tipo lateral móvel na região de Zaragoza, Espanha. Os autores determinaram as PEA em função das variáveis meteorológicas velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar. Quando aplicado o teste estatístico *t* de Student sob as variáveis climáticas, Playán *et al.* (2005) obtiveram que a velocidade do vento como a única variável explicativa.

Um estudo semelhante foi desenvolvido por Ortíz *et al.* (2009) que avaliou as PEA em função da velocidade do vento, temperatura do ar e umidade relativa do ar, na região de Albacete, Espanha. Os autores verificaram que a velocidade do vento também foi a única variável explicativa das PEA.

Dechmi *et al.* (2003), Playán *et al.* (2004) e Colombo *et al.* (2015) também determinaram as PEA para diferentes regiões, em diferentes sistemas de irrigação e também obtiveram a velocidade do vento como variável explicativa. Os resultados obtidos pelos autores e este trabalho corroboram com a afirmação de Tarjuelo *et al.* (2000) que a velocidade do vento tem um papel importante nas PEA.

Faci *et al.* (2001) analisaram o tipo de spray, diâmetro de bocal, velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar como variáveis independentes para explicar as PEA. Os autores observaram que as variáveis explicativas foram diâmetro de bocal, velocidade do vento e temperatura do ar. Faci *et al.* (2001) acreditam que um protocolo mais intenso e elaborado do experimento, poderia acusar outras variáveis como explicativa para as PEA. Outros trabalhos também selecionaram velocidade do vento e temperatura do ar como variáveis explicativas das PEA (HERMSMEIER, 1973; SEGNER, 1971; SILVA; JAMES, 1988; TARJUELO, 1995; YAZAR, 1984) corroborando com os resultados obtidos por este trabalho.

5.5. Identidade de modelos

O modelo reduzido é representado pela Equação (13) e na Tabela 23 é mostrado a Análise de Variância – ANOVA para o modelo reduzido, utilizando os dados de velocidade do vento, temperatura do ar e PEA dos emissores Orbitor e Rotator.

$$PEA = -0,593 + 10,322 * V_v + 0,752 * T \quad (13)$$

em que

PEA = Perdas por evaporação e arraste, em %;

V_v = Velocidade do vento, $m s^{-1}$ e

T = Temperatura do ar, °C.

Tabela 23 - Análise de Variância para o modelo reduzido, utilizando dados do emissor Orbitor e Rotator.

	GL	SQ	QM	F	P
Velocidade do Vento	1	2.543,20	2.543,20	110,867	<0,001*
Temperatura do ar	1	374,88	374,88	16,342	<0,001*
Resíduo	37	848,75	22,94		
Total	39	3.766,83			

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

De acordo com as Tabelas 17 e 22 a SQR_2 para o emissor Orbitor e a SQR_3 do emissor Rotator são, 386,27 e 192,13, respectivamente. A partir desses dados, calcula-se o valor de $SQR_4 = 598,40$ e $SQR_5 = 270,35$. Utilizando a Equação (5) obteve-se o valor de $F_{calc} = 5,29$. Tem-se que valor tabelado de $F_{tab} = 3,28$.

Comparando o F_{calc} com o F_{tab} , através do teste de identidade de modelos, tem-se que $F_{calc} > F_{tab}$ a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, rejeita-se a hipótese de nulidade (H_0). Portanto um único modelo reduzido não é adequado para representar as PEA para os dois emissores. Neste sentido, mostra-se necessário a utilização de dois modelos distintos para os emissores analisados.

Tendo em vista que o modelo reduzido não foi válido para representar os dois emissores, foi realizado a identidade dos parâmetros, com a finalidade de se obter uma melhor compreensão dos parâmetros gerados.

Para o teste de identidade dos parâmetros do β_0 , assumiu-se que os parâmetros não analisados, β_1 e β_2 , foram mantidos constantes. Na Tabela 24 é mostrado a ANOVA do teste. A partir da ANOVA, tem-se que a hipótese de nulidade (H_0) é

rejeitada ($p < 0,05$), podendo afirmar que os β_0 são diferentes estatisticamente para as duas equações a um nível de significância de $\alpha = 0,05$.

Tabela 24 - Análise de Variância para o teste de igualdade com β_0 idênticos.

	GL	SQ	QM	F	p-valor
Modelo	2	24.414,79	8.138,26	348,245	0,01*
Resíduo	37	864,66	23,36		
Total	39	25.279,45	8.161,62		

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

A análise do β_1 foi feita assumindo que os valores de β_0 e β_2 foram constantes. A ANOVA apresentada na Tabela 25 indica, assim como o β_0 , a rejeição (p -valor = 0,002) da hipótese nula (H_0), ou seja, os β_1 das equações são diferentes estatisticamente a um nível de significância de $\alpha = 0,05$.

Tabela 25 - Análise de Variância para o teste de igualdade com β_1 idênticos.

	GL	SQ	QM	F	p-valor
Modelo	2	4,341	1,447	964,42	0,002*
Resíduo	37	0,3376	0,002		
Total	39	4,6788	1,449		

*significativo a 5% de significância

Fonte: Autor

O mesmo procedimento foi realizado para análise do β_2 , em que os valores de β_0 e β_1 foram mantidos constantes. A Tabela 26 apresenta a ANOVA em que a hipótese nula (H_0) não é rejeitada (p -valor = 1,0), indicando que não há diferença estatística deste parâmetro para as duas equações. Ou seja, os β_2 do modelo do emissor Orbitor é estatisticamente igual ao β_2 do modelo do emissor Rotator.

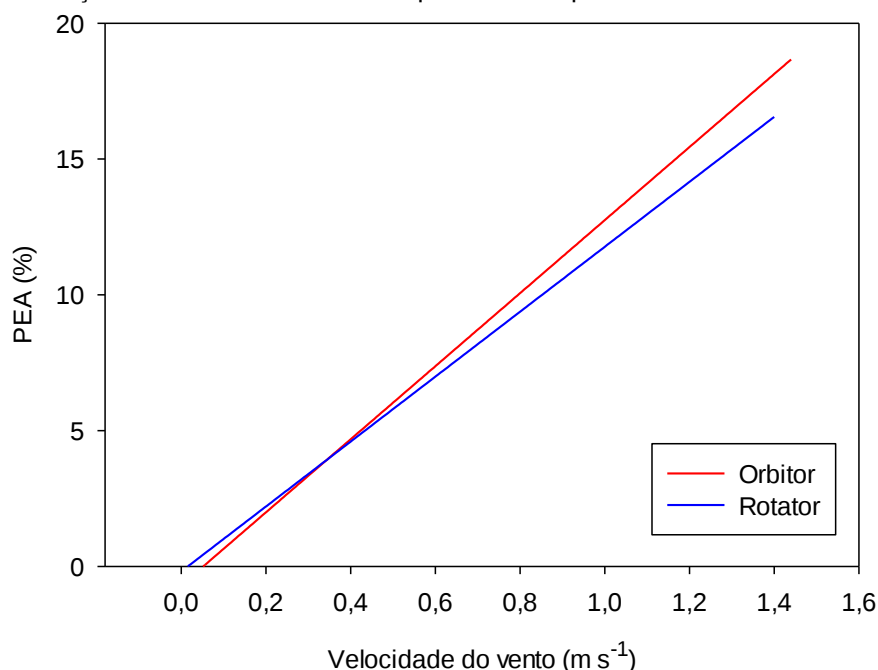
Tabela 26 - Análise de Variância para o teste de igualdade com β_2 idênticos.

	GL	SQ	QM	F	p-valor
Modelo	2	13.683,01	1.520,56	290,95	1,0 ^{ns}
Resíduo	37	9.928,67	522,56		
Total	39	23.611,68	2.043,12		

Fonte: Autor

A Figura 7 demonstra o comportamento das PEA em função da velocidade do vento quando a temperatura do ar é mantida constante.

Figura 7 - PEA em função da velocidade do vento quando a temperatura do ar é mantida constante



Fonte: Autor

Com o teste de identidade de parâmetros, foi possível observar que o coeficiente β_2 (temperatura do ar) não se difere para as duas equações. Portanto, considerando valores constantes de β_2 é possível inferir que, em locais velocidade do vento abaixo de $0,3 \text{ m s}^{-1}$, o emissor Rotator é mais suscetível às PEA. Em locais com velocidade do vento superior a $0,3 \text{ m s}^{-1}$ o emissor Orbitor é mais suscetível às PEA, ou seja, nesse intervalo, o emissor Rotator se mostrou mais eficiente que o emissor Orbitor.

5.6. Uniformidade de aplicação de água do sistema

As Tabelas 27 e 28 mostram os resultados dos coeficientes de uniformidade avaliados para os emissores Orbitor e Rotator, respectivamente, nos diferentes horários avaliados (00h00min, 06h00min, 12h00min e 18h00min). Os valores médios de velocidade do vento foram descritos nas Tabelas 9 e 10 variando de $0,00$ a $1,40 \text{ m s}^{-1}$ estando de acordo com a recomendação da NBR 14244 (ABNT, 1998), cujo valor limite é de $3,0 \text{ m s}^{-1}$.

Tabela 27 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente de Uniformidade Absoluto (CUA) para o emissor Orbitor.

Data	CUC (%)	CUD (%)	CUA (%)
Horário 00h00min			
10/set	85%	77%	72%
11/set	84%	77%	71%
13/set	83%	77%	72%
14/set	81%	74%	65%
15/set	83%	75%	71%
Média	83%	76%	70%
Horário 06h00min			
04/set	83%	74%	68%
09/set	86%	78%	73%
11/set	82%	73%	71%
12/set	87%	80%	72%
13/set	86%	77%	74%
Média	85%	77%	72%
Horário 12h00min			
04/set	79%	68%	69%
06/set	82%	75%	65%
09/set	82%	70%	72%
11/set	81%	69%	70%
12/set	76%	64%	64%
Média	80%	69%	68%
Horário 18h00min			
09/set	79%	68%	69%
10/set	82%	75%	65%
12/set	82%	70%	72%
13/set	81%	69%	70%
14/set	76%	64%	64%
Média	80%	69%	68%
Média Geral	82%	73%	69%

Fonte: Autor

Tabela 28 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente de Uniformidade Absoluto (CUA) para o emissor Rotator.

Data	CUC (%)	CUD (%)	CUA (%)
Horário 00h00min			
15/out	86%	79%	69%
16/out	86%	78%	68%
17/out	83%	74%	66%
18/out	86%	78%	68%
19/out	85%	74%	67%
Média	85%	76%	68%
Horário 06h00min			
16/out	84%	72%	68%
17/out	80%	64%	64%
18/out	82%	72%	65%
19/out	83%	69%	67%
20/out	84%	73%	66%
Média	83%	70%	66%
Horário 12h00min			
16/out	82%	69%	64%
17/out	80%	68%	62%
18/out	78%	63%	60%
19/out	81%	67%	63%
20/out	80%	65%	62%
Média	80%	66%	62%
Horário 18h00min			
15/out	84%	75%	66%
16/out	83%	73%	64%
17/out	80%	68%	62%
18/out	78%	70%	61%
19/out	82%	72%	62%
Média	81%	72%	63%
Média Geral	82%	71%	65%

Fonte: Autor

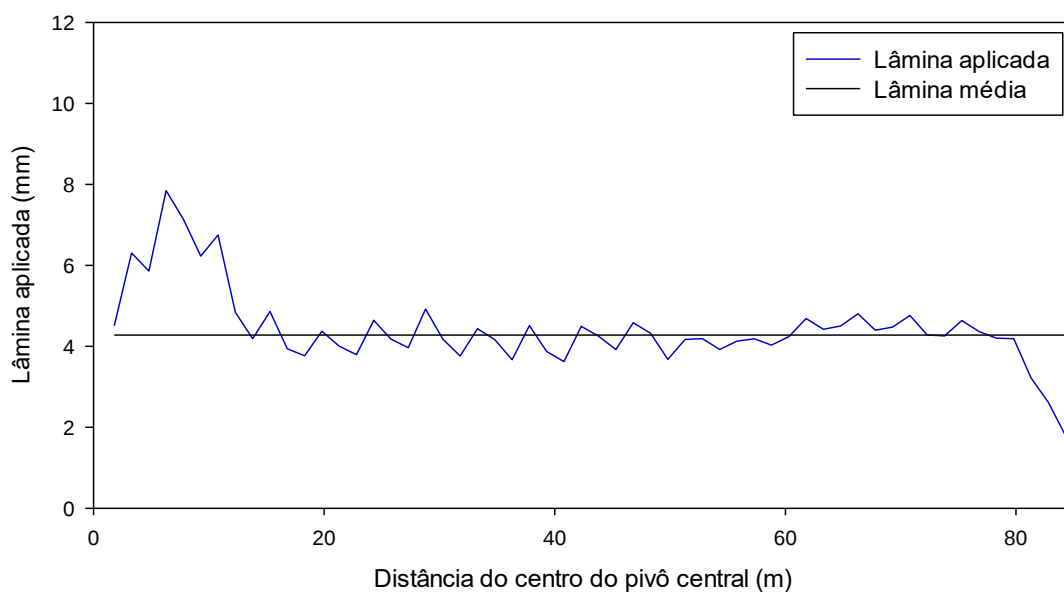
Ambos os emissores obtiveram resultados satisfatórios e consistentes do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) independente do horário de avaliação, variando de 80 a 85%, com média geral de 82%, sendo classificado como “bom” pela metodologia proposta por Montovani et al. (2001). Bernardo et al. (2019) recomenda que para os valores de CUC obtidos o cultivo seja de sistema radicular profundo ($80\% < \text{CUC} < 85\%$).

O Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) proposto por Criddle et al. (1956) considera a lâmina média do menor quartil para o cálculo. Os valores de CUD deste trabalho variaram de 69 a 77%, com média geral de 73% para o emissor Orbitor e 66 a 76%, com média geral de 71% para o emissor Rotator. De acordo com Montovani et al. (2001), ambos os emissores foram classificados como “bom”.

Proposto por Karmeli & Keller (1975) o Coeficiente de Uniformidade Absoluto (CUA) para o emissor Orbitor se manteve entre 68 e 72%, com um valor médio de 69%, enquanto o emissor Rotator permaneceu entre 62 e 68%, com um valor médio de 65%. De acordo com Bralts (1986) ambos os emissores foram classificados como “ruim”.

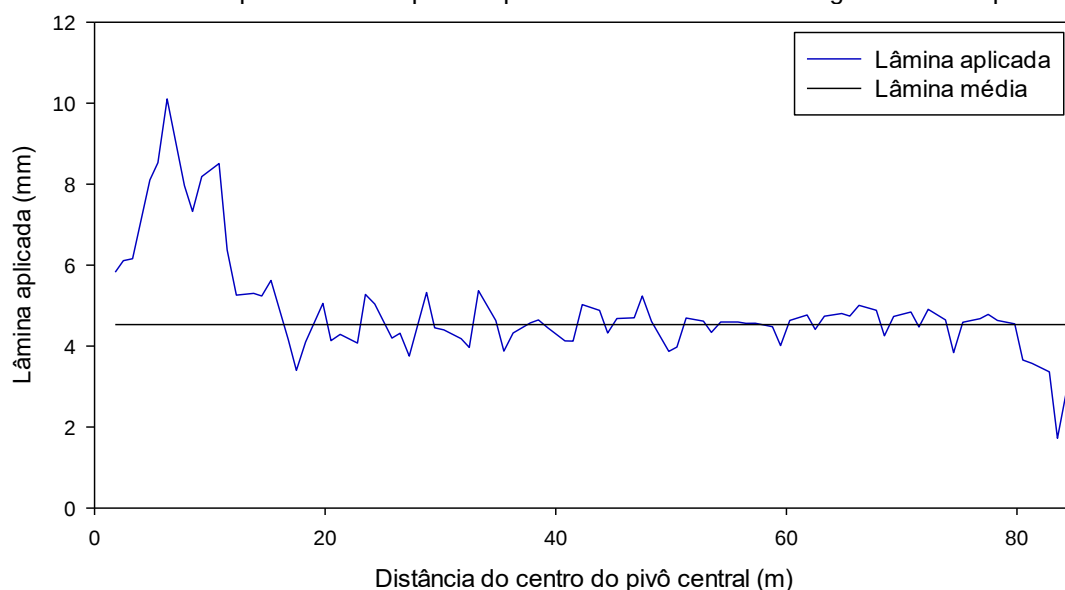
As figuras dos perfis de distribuição da média ponderada das lâminas coletadas ao longo do raio do pivô central em função da lâmina média ponderada para os emissores Orbitor e Rotator foram apresentados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

Figura 8 - Lâmina média ponderada e lâmina aplicada pelo emissor Orbitor ao longo do raio do pivô central



Fonte: Autor

Figura 9 - Lâmina média ponderada e aplicada pelo emissor Rotator ao longo do raio do pivô central



Fonte: Autor

O cálculo do Coeficiente de Uniformidade Absoluto (CUA) leva em consideração a razão das lâminas máximas e mínimas aplicadas pelos emissores com as lâminas médias. Neste sentido o baixo desempenho dos emissores em relação do CUA, pode ser causado pela alta lâmina aplicada no início do pivô central, diminuindo a uniformidade.

A baixa uniformidade de aplicação de água do sistema, leva ao aumento da lâmina bruta aplicada quando comparado a sistemas de alta uniformidade, a fim de se obter a mesma produtividade de uma determinada cultura (RING; HEERMANN, 1978). Mantovani *et al.* (1995) observaram que quanto maior o valor do CUC no pivô central, menor é a lâmina de irrigação necessária para alcançar o máximo da produtividade do milho. Irrigações em sistemas eficientes e realizados de forma racional, pode-se economizar água e energia em até 20 e 30% respectivamente (TOLEDO *et al.*, 2017)

Um grande problema da baixa uniformidade de aplicação de água é que será maior o excedente de irrigação nas áreas superirrigadas, promovendo escoamento superficial em algumas áreas do pivô central, ou ainda, maior será o déficit de água para culturas nas áreas subirrigadas do pivô central, causando estresse hídrico (MANTOVANI *et al.*, 2012)

Segundo Bernardo *et al.* (2019) uma característica do pivô central é que a cada unidade de comprimento de raio, deve-se irrigar uma área maior à medida que se afasta do centro. Para obter uma aplicação uniforme, é necessário que a vazão

aplicada aumente à medida que se afastar do centro do pivô central. Caso os emissores iniciais forem mal projetos, superestimando os valores necessários de vazão, poderá ocorrer uma alta aplicação de água no início do pivô central podendo causar escoamento superficial. De acordo com Cainelli *et al.* (1997) as lâminas acima da média nos primeiros emissores podem ser causadas por problemas de funcionamento das válvulas reguladoras de pressão, uma vez que é nessa região que pode-se constatar a ocorrência das pressões mais elevadas ao longo do pivô central.

É possível observar, pelas Figura 8 e 9, que no início do pivô central a lâmina aplicada é elevada, depois é estabilizada próximo da média ponderada. No teste de vazão dos emissores, como mostrado nas Tabelas 7 e 8, os primeiros emissores apresentaram vazão coletada superior a vazão de catalogo, podendo isto ter influenciado na alta lâmina aplicada no início do pivô central.

As lâminas abaixo da média nos últimos emissores podem ter sido causadas por problemas de entupimento, uma vez em que em um determinado local da área irrigada, o declive era suficiente para o emissor passar na cota do solo fazendo com que o emissor precisasse ser desentupido diversas vezes durante os testes.

De acordo com as Tabelas 7 e 8 que os últimos emissores obtiveram lâminas coletadas próximas as lâminas de catalogo, podendo também, os emissores tem sido dimensionado abaixo da sua vazão necessária.

CONCLUSÕES

- Nas condições analisadas as variáveis meteorológicas que tiveram efeitos sobre as PEA foram a velocidade do vento e temperatura. Sendo a velocidade do vento a variável mais explicativa para as PEA.
- Para ambos os emissores, os maiores valores de PEA foram observados nos horários diurnos (06:00h e 12:00h). O emissor Rotator também apresentou alto valor de PEA as 18:00h.
- Dentro os modelos existentes na literatura, nenhum apresentou boa correlação com os dados coletados.
- A equação ajustada para o emissor Orbitor e Rotator são, respectivamente:

$$PEA = -1,809 + 14,452 * V_v + 0,662 * T - R^2 = 0,81$$

$$PEA = -0,317 + 12,085 * V_v + 0,623 * T - R^2 = 0,83$$

- Ambos os emissores apresentaram CUC e CUD classificado como “bom”. E para ambos os emissores o CUA foi classificado como ruim.
- Para locais com condições de baixa velocidade do vento ($< 0,3 \text{ m s}^{-1}$) recomenda-se o uso do emissor Orbitor. Para locais com condições de alta velocidade do vento ($> 0,3 \text{ m s}^{-1}$) recomenda-se o uso do emissor Rotator.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, 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.
- ABO-GHOBAR, Hussein M. Losses from low-pressure center-pivot irrigation systems in a desert climate as affected by nozzle height. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 21, n. 1–2, p. 23–32, 1992.
- ADAMS, Warwick R.; ZELEKE, Ketema T. Diurnal effects on the efficiency of drip irrigation. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 141–157, 2017.
- AL-GHOBARI, H. M.; MOHAMMAD, F. S.; EL MARAZKY, M. S. A. Assessment of smart irrigation controllers under subsurface and drip-irrigation systems for tomato yield in arid regions. **Crop and Pasture Science**, [s. l.], v. 66, n. 10, p. 1086–1095, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/CP15065>
- AL-GHOBARI, Hussein M. *et al.* Prediction of wind drift and evaporation losses from sprinkler irrigation using neural network and multiple regression techniques. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 195, p. 211–221, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.005>
- ALBAJI, Mohammad *et al.* Investigation of surface, sprinkler and drip irrigation methods based on the parametric evaluation approach in Jaizan Plain. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 1–10, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2013.11.001>
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada.** Brasília, DFANA, , 2017.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil.** Brasília, DFANA, , 2018. Disponível em: [http://www.extranjeria.gob.cl/filesapp/Informe Estimacion Poblacion Extranjeros 2008.pdf](http://www.extranjeria.gob.cl/filesapp/Informe%20Estimacion%20Poblacion%20Extranjeros%202008.pdf)
- ANA, Agência Nacional de Águas; EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento Da Agricultura Irrigada Por Pivôs Centrais No**

Brasil. Brasília, DFANA, , 2019.

ANDRADE, C. W. L. *et al.* **Modelagem Hidrológica de uma sub-bacia do Alto Mundaú utilizando o modelo SWATXII** Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste-ABRHAracajú, SE, Brasil, 2016.

ASABE. **Standarts 43rd Edition**American Soc. of Agric. and Biological EngineersSt. Joseph, MI, 1996.

BATTISTI, Rafael *et al.* Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 159–168, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>

BERNARDO, Salassier *et al.* **Manual de Irrigação**. 9. ed. Viçosa: Editora UFV, 2019.

BESKOW, Samuel *et al.* Perdas de água por evaporação e arraste na irrigação por aspersão nas condições climáticas de Lavras-MG, utilizando aspersores de tamanho médio. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 113–127, 2008.

BESKOW, Samuel *et al.* Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste em aspersores de média pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 221–228, 2011.

BRALTS, V. F. Field performance and evaluation. *In: Developments in Agricultural Engineering*. [s.l.] : Elsevier, 1986. v. 9p. 216–240.

BRENNAN, Donna. Factors affecting the economic benefits of sprinkler uniformity and their implications for irrigation water use. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 109–119, 2008.

CAINELLI, Vitor Hugo *et al.* Desempenho e uniformidade da distribuição de água de um pivô central. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 35–40, 1997.

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, Paulo C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de agrometeorologia**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CHRISTIANSEN, Jerald Emmett. **Irrigation by Sprinkling**. Berkeley.

COLOMBO, Alberto *et al.* Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste de sprays de placa oscilante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 19, n. 8, p. 719–726, 2015.

CORREIA, Caio César Silva Alvarenga *et al.* Irrigation of radish cultivars in the region of Viçosa, Minas Gerais, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 1–10, 2020.

CRIDDLE, Wayne D. *et al.* **Methods for evaluating irrigation systems**. [s.l.] : Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, 1956.

DAVIS, Charles S.; HALL, Daniel B. A computer program for regression analysis of ordered categorical repeated measurements. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, [s. l.], v. 51, n. 3, p. 153–169, 1996.

DECHMI, F. *et al.* Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize [*Zea mays*]. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 67–77, 2003.

EDLING, R. J. Kinetic Energy, Evaporation and Wind Drift of Droplets from Low Pressure Irrigation Nozzles. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 28, n. 5, p. 1543–1550, 1985. Disponível em:
<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=32475&t=3>

ENTESARI, M. R.; HEYDARI, N.; KHEYRABI, J. Water use efficiency in greenhouse cultivation. *In*: PUBLICATION OF IRAN NATIONAL IRRIGATION AND DRAINAGE COMMITTEE, 2007, Tehran. **Anais eletrônicos** [...]. Tehran

FACI, J. M.; BERCERO, A. Efecto del viento en la uniformidad y en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión. **Investigation Agrária - Produccion y Proteccion Vegetable**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 171–182, 1991.

FACI, J. M.; SALVADOR, R.; PLAYA, E. A comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 127, n. 4, p. 224–233, 2001.

FARG, E. *et al.* Evaluation of water distribution under pivot irrigation systems using remote sensing imagery in eastern Nile delta. **Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, [s. l.], v. 20, p. S13–S19, 2017. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.001>

FARIA, Lessandro Coll *et al.* Irrigation distribution uniformity analysis on a lateral-move irrigation system. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 195–206, 2019.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-019-00619-5>

FERNANDES, Kennedy M. *et al.* Use of the Luus – Jaakola optimization method to minimize water and energy consumption in scheduling irrigation with center pivot systems. **Irrigation Science**, [s. l.], 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s00271-020-00663-6>

FIALHO, Edson; QUINA, Robson. O campo térmico no município de Viçosa-MG, Brasil, durante o período de verão (2014/2015) e inverno (2015). **GOT - Journal of Geography and Spatial Planning**, [s. l.], n. 12, p. 127–151, 2017.

FROST, K. R.; SCHWALEN, H. C. Sprinkler Evaporation Losses. **Agricultural Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 18–24, 1960.

GOEBEL, Timothy S.; LASCANO, Robert J. Rainwater use by cotton under subsurface drip and center pivot irrigation. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 215, p. 1–7, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.027>

GRAYBILL, Franklin A. **Theory and application of the linear model**. [s.l.] : Duxbury press North Scituate, MA, 1976. v. 183

HEERMANN, D. F.; HEIN, P. R. Performance Characteristics of Self-Propelled Center-Pivot Sprinkler Irrigation System. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 11, n. 1, p. 11–15, 1968. Disponível em:

<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=39320&t=3>

HERMSMEIER, L. F. Evaporation During Sprinkler Application in a Desert Climate. **ASAE**, ASAE paper. [s. l.], v. 73, ASAE paper, p. 216, 1973. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=LrHeYgEACAAJ>

JIMÉNEZ, M. *et al.* Effect of irrigation uniformity on evapotranspiration and onion yield. **Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 148, n. 2, p. 139–157, 2010.

KARMEI, David; KELLER, Jack. **Trickle Irrigation Design**. [s.l.] : American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1975.

KELLER, Jack; BLIESNER, Ron D. Sprinkle and trickle irrigation. [s. l.], 1990.

LI, Jiusheng; RAO, Minjie. Sprinkler water distributions as affected by winter wheat canopy. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 29–35, 2000.

LOO, Yen Yi; BILLA, Lawal; SINGH, Ajit. Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia. **Geoscience Frontiers**, [s. l.], v. 6, n. 6, p. 817–823, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2014.02.009>

LOURENÇO, Rodrigo Dal Sasso. **Modelagem das perdas por evaporação e arraste em emissores de placa defletora fixa e rotativa oscilante na irrigação via pivô central**. 2018. 1–15 f. Dissertação. Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, MG, 2018.

MAGALHÃES, Sérgio Ricardo; ANDRADE, Ednaldo Antônio de. Teste Para Verificar a Igualdade de Modelos de Regressão e uma Aplicação na Área Médica. **E-Xacta**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 34–41, 2009.

MANKE, Emanuele Baifus *et al.* Wind drift and evaporation losses of a mechanical lateral-move irrigation system: Oscillating plate versus fixed spray plate sprinklers. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 225, p. 105759, 2019.

MANTOVANI, E. C. *et al.* Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 27, n. 3–4, p. 243–257, 1995.

MANTOVANI, Everardo C. *et al.* Estimativa de produtividade da cultura do feijão irrigado em cristalina-go, para diferentes lâminas de irrigação como função da uniformidade de aplicação. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 110–120, 2012.

MANTOVANI, Everardo Chartuni. **AVALIA: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada** Viçosa, MGUFV, , 2001.

MAREY, Samy A.; EL MARAZKY, Mohamed SA; ABOUKARIMA, Abdulwahed M. Prediction of wind drift and evaporation losses of a sprinkler irrigation system using principal component analysis and artificial neural network technique. **Water SA**, [s. l.], v. 44, n. 3, p. 338–347, 2018.

MARJANG, N.; MERKLEY, G. P.; SHABAN, M. Center-pivot uniformity analysis with variable container spacing. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 149–156, 2012.

MAROUFPOOR, E. *et al.* Estimation of wind drift and evaporation losses from sprinkler irrigation systems by different data-driven methods. **Irrigation and Drainage**, [s. l.], v. 232, n. 67, p. 222–232, 2018.

MATEOS, L. Assessing whole-field uniformity of stationary sprinkler irrigation systems. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 73–81, 1998.

MCLEAN, R.; SRI RANJAN, Ramanathan; KLASSEN, G. Spray evaporation losses from sprinkler irrigation systems. **Canadian Agricultural Engineering**, [s. l.], v. 42, p. 1–8, 2000.

MENDOZA, C. J. C.; FRIZZONE, J. A. Economia de Energia em Irrigação por Pivô Central em Função da Melhoria da Uniformidade da Distribuição de Água. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 184–197, 2012.

MERRIAM, John L.; KELLER, Jack. **Farm irrigation system evaluation: A guide for management** **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Utah State University., , 1978.

MOHAMED, Abdelmoneim Z. *et al.* Adjusting irrigation uniformity coefficients for unimportant variability on a small scale. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 213, p. 1078–1083, 2019. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.017>

MOLLE, B. *et al.* Evaporation and wind drift losses during sprinkler irrigation influenced by droplet size distribution. **Irrigation and Drainage**, [s. l.], v. 61, n. 2, p. 240–250, 2012.

MONAGHAN, James M. *et al.* More “crop per drop”: Constraints and opportunities for precision irrigation in European agriculture. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 93, n. 5, p. 977–980, 2013.

MONTAZAR, A.; SADEGHI, M. Effects of applied water and sprinkler irrigation uniformity on alfalfa growth and hay yield. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 95, n. 11, p. 1279–1287, 2008.

MONTERO, J. **Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario. Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión (SIRIAS)**. 1999. Universidad de Castilla-la Mancha, [s. l.], 1999.

MONTERO, J. *et al.* Analysis of water application costs with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 507–521, 2013.

MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; CARRIÓN, P. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropluviometer. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 47–56, 2003.

NASCIMENTO, A. K. *et al.* Effects of irrigation uniformity on yield response and production economics of maize in a semiarid zone. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 211, p. 178–189, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.051>

OKER, Tobias E. *et al.* Evaluation of dynamic uniformity and application efficiency of mobile drip irrigation. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 17–35, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00648-0>

ORTEGA, J. F. *et al.* Discharge Efficiency in Sprinkling Irrigation : Analysis of the Evaporation and Drift Losses in Semi-arid Areas. **CIGR E-Journal**, [s. l.], v. 2, n. 1989, p. 1–21, 2000.

ORTÍZ, J. N.; TARJUELO, J. M.; DE JUAN, J. A. Characterisation of evaporation and drift losses with centre pivots. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 96, n. 11, p. 1541–1546, 2009.

ORTÍZ, José Nicolás Romero *et al.* Set Sprinkler Irrigation and Its Cost. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 132, n. 5, p. 445–452, 2006.

OUAZAA, S.; BURGUETE, J.; ZAPATA, N. Solid-set sprinklers irrigation of field boundaries: experiments and modeling. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 85–103, 2016.

PLAYÁN, E. *et al.* Characterizing pivot sprinklers using an experimental irrigation machine. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 70, n. 3, p. 177–193, 2004.

PLAYÁN, E. *et al.* Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 76, n. 3, p. 139–159, 2005.

REZENDE, R. *et al.* Non-Uniformity Conventional Sprinkler Irrigation Effects on Bean Yield. *In*: ACTA HORTICULTURAE, 2000, **Anais eletrônicos [...]** : International

Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.537.102>

RING, Len; HEERMANN, Dale F. Determining center-pivot sprinkler uniformities. **Paper**, [s. l.], n. 78–2001, 1978.

ROGERS, Danny H. *et al.* Center pivot irrigation system losses and efficiency. **Proceedings of the 29th annual central plains irrigation conference**, Colorado, USA, p. 19–34, 2017.

SADEGHI, S. H. *et al.* Continuous variation of wind drift and evaporation losses under a linear move irrigation system. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 182, p. 39–54, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.009>

SALVATIERRA-BELLIDO, B.; MONTERO-MARTÍNEZ, J.; PÉREZ-URRESTARAZU, L. Development of an automatic test bench to assess sprinkler irrigation uniformity in different wind conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 151, p. 31–40, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.036>

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**, [s. l.], v. 102, n. 1, p. 13–24, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.002>

SARWAR, Abid; PETERS, R. Troy; MOHAMED, Abdelmoneim Zakaria. Linear mixed modeling and artificial neural network techniques for predicting wind drift and evaporation losses under moving sprinkler irrigation systems. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 182, p. 39–54, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00659-x>

SAYYADI, H. *et al.* Artificial neural networks for simulating wind effects on sprinkler distribution patterns. **Spanish Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 1143–1154, 2012.

SEGINER, I. Water distribution under sprinkler distribution. **Transactions of the ASAE**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 656–659, 1971.

SENTELHAS, P. C. *et al.* The soybean yield gap in Brazil - Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, [s. l.],

I.], v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.

SILVA, Washington L. C.; JAMES, Larry G. Modeling Evaporation and Microclimate Changes in Sprinkle Irrigation: I. Model Formulation and Calibration. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 31, n. 5, p. 1481–1486, 1988. Disponível em: <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=30889&t=3>

SINGH, Gurjeet; PANDA, Rabindra K.; NAIR, Archana. Regional scale trend and variability of rainfall pattern over agro-climatic zones in the mid-Mahanadi river basin of eastern India. **Journal of Hydro-Environment Research**, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2019.11.001>

TARJUELO, J. M. *et al.* Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 43, n. 3, p. 263–284, 2000.

TARJUELO, José María. **El riego por aspersión y su tecnología**. [s.l.] : Madri: Mundi-Prensa, 1995.

TARJUELO, José María. **El riego por aspersión y su tecnología**. [s.l.] : Ediciones Mundi-Prensa, 2005.

TOLEDO, Cristian Epifânio *et al.* Eficiência da aplicação da água por pivô central em diferentes regiões de Minas Gerais. **Irriga**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 821–831, 2017.

TRIMMER, Walter L. Sprinkler evaporation loss equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 113, n. 4, p. 616–620, 1987.

WELDE, Kidane; GEBREMARIAM, Hintsu Libsekal; KAHSAY, Kiflom Degif. Optimizing irrigation water levels to improve yield and water use efficiency of vegetables: case study of tomato. **Sustainable Water Resources Management**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 737–742, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s40899-018-0250-8>

WILLMOTT, Cort J. On the validation of models. **Physical Geografy**, [s. l.], v. 2, p. 184–194, 1981.

YACOUBI, S. *et al.* Day and night time sprinkler irrigated tomato: Irrigation performance and crop yield. **Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 107, n. 1, p. 25–35, 2010.

YAZAR, Attila. Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 439–449, 1984.

ZAPATA, N. *et al.* Low-pressure sprinkler irrigation in maize: Differences in water distribution above and below the crop canopy. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 203, n. March, p. 353–365, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.025>

ZAZUETA, Fedro S. Evaporation Loss During Sprinkler Irrigation. **University of Florida Bulletin**, [s. l.], n. 290, p. 1–7, 2011.

ZENG, Chun Zhi; BIE, Zhi Long; YUAN, Bao Zhong. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 96, n. 4, p. 595–602, 2009.