

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

**Modelagem probabilística das lâminas de água aplicadas na cultura do arroz
por um equipamento mecanizado de irrigação tipo lateral móvel**

Bernardo Gomes Nörenberg

Pelotas, 2015

Bernardo Gomes Nörenberg

**Modelagem probabilística das lâminas de água aplicadas na cultura do arroz
por um equipamento mecanizado de irrigação tipo lateral móvel**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Lessandro Coll Faria
Coorientador: Prof. Dr. Osvaldo Rettore Neto

Pelotas, 2015

Bernardo Gomes Nörenberg

Modelagem probabilística das lâminas de água aplicadas na cultura do arroz por um equipamento mecanizado de irrigação tipo lateral móvel

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDTec), Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 25 de Agosto de 2015

Banca examinadora:

Prof. Dr. Lessandro Coll Faria (Orientador)

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras.

Prof. PhD. Alberto Colombo

Doutor em Engenharia de Irrigação pela Utah State University.

Prof. Dr. Luís Carlos Timm

Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ/USP.

Prof. Dr. Samuel Beskow

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

N834m Nörenberg, Bernardo Gomes

Modelagem probabilística das lâminas de água aplicadas na cultura do arroz por um equipamento mecanizado de irrigação tipo lateral móvel / Bernardo Gomes Nörenberg ; Lessandro Coll Faria, orientador ; Osvaldo Rettore Neto, coorientador. — Pelotas, 2015.

67 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2015.

1. Aspersão. 2. Vento. 3. Uniformidade. 4. I-wob. I. Faria, Lessandro Coll, orient. II. Rettore Neto, Osvaldo, coorient. III. Título.

CDD : 627

Dedicatória

Dedico este trabalho especialmente à minha família, minha mãe Neuza Rejane Gomes Nörenberg, meu pai Edgar Martin Nörenberg e minha irmã Marina Gomes Nörenberg.

Agradecimentos

Primeiramente à minha família, minha mãe Neuza Rejane Gomes Nörenberg, meu pai Edgar Martin Nörenberg e minha irmã Marina Gomes Nörenberg por todo apoio e incentivo nas horas difíceis de desânimo e cansaço.

À Universidade Federal de Pelotas, mais especificamente ao Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos, por ter proporcionado minha formação acadêmica.

Ao meu orientador, Professor Doutor Lessandro Coll Faria, pela orientação, apoio, confiança e empenho dedicado à elaboração deste trabalho, e, ao meu coorientador Professor Doutor Osvaldo Rettore Neto, por todo auxílio prestado a mim, durante o período de realização deste curso de pós-graduação.

Agradeço a todos os professores e técnicos por me proporcionarem um grande aprimoramento técnico, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

Meus agradecimentos aos amigos e colegas que fizeram parte da minha formação e que com certeza vão continuar presentes em minha vida.

Agradeço ao Matheus Chagas Simões, Emanuele Manke, Maria Clotilde Chagas Neta e demais colegas pelo empenho dedicado aos ensaios de campo para a realização deste trabalho.

Aos funcionários da Embrapa Terras Baixas, em especial ao Pesquisador Doutor José Maria Barbat Parfitt, e aos funcionários Moacir Furtado Rodrigues e Mikael Bueno Longaray, pela disponibilidade, auxílio e dedicação nos trabalhos efetuados em campo, os quais deram início a este estudo.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

NÖRENBERG, Bernardo Gomes. **Modelagem probabilística das lâminas de água aplicadas na cultura do arroz por um equipamento mecanizado de irrigação tipo lateral móvel**. 2015. 67f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

Resumo

A agricultura irrigada, em um cenário mundial, é o setor que mais utiliza água, sendo que, no Brasil, especialmente no estado do Rio Grande do Sul, o método de irrigação mais utilizado é o de irrigação por superfície com o sistema de inundação contínua, amplamente utilizado na cultura do arroz. Entretanto, a irrigação por aspersão, se manejada adequadamente, tem potencial de suprir a demanda hídrica da cultura utilizando um volume menor de água. Assim sendo, este estudo teve por objetivo avaliar um equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel operando em condições de vento, assim como testar a adequabilidade com que as distribuições de probabilidade normal, uniforme, gama, Weibull e logística descrevem a distribuição da lâmina de água aplicada por um equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel utilizado na cultura do arroz, operando em condições de vento na região sul do Rio Grande do Sul, assim como, gerar um modelo para simulação dos parâmetros das distribuições que melhor representarem o perfil da lâmina aplicado pelo equipamento por meio da velocidade média do vento. Para isso foram realizados 29 ensaios de campo no equipamento de irrigação, o qual contém, em 5 vãos, 265 metros de comprimento, equipado com emissores modelo I-Wob com placa oscilante de 9 jatos. Para coletar a lâmina de água aplicada pelo equipamento na área irrigada foram utilizadas duas linhas de coletores paralelas, distantes 5 m e, cada uma, contendo 88 coletores espaçados 3 m entre si. Foi observado a alta uniformidade de aplicação de água do equipamento, mesmo em condições elevadas de vento ($V > 6,00 \text{ m.s}^{-1}$). Além disso, as distribuições normal, logística e Weibull de probabilidades se ajustaram adequadamente à maioria dos ensaios de campo. Os parâmetros de escala das distribuições normal e logística tiveram uma boa explicação na sua variação em função da velocidade média do vento, resultado esse não obtido para a distribuição Weibull. Os modelos propostos através dos parâmetros de Escala das distribuições normal e logística representaram de forma adequada, o desempenho do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel utilizado na irrigação do arroz na região sul do Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: Aspersão, Vento, Uniformidade, I-Wob

NÖRENBERG, Bernardo Gomes. **Probabilistic modeling of water depths applied in a rice crop by a mechanical lateral move irrigation equipment.** 2015. 67p. Dissertation (Master in Water Resources) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

Abstract

On a world stage, the irrigated agriculture is the activity that uses more water, and, in Brazil, especially in the state of Rio Grande do Sul, the most widely used method of irrigation is surface irrigation with continuous flooding system, widely used in rice cultivation. However, sprinkler irrigation, if managed properly, has the potential to meet the water demand of the crop using a smaller volume of water. Therefore, this study aimed to evaluate a mechanical lateral move irrigation equipment used on a rice crop and operating in windy conditions, as well as test the adequacy with which the distributions of normal probability, uniform, gamma, Weibull and logistics describe the distribution of water depth applied by the mechanical lateral, operating in windy conditions in southern of Rio Grande do Sul, as well as generate a model to simulate the parameters of the distributions that better represent the profile of the applied depth by the equipment through the average wind speed. To do this were performed 29 in-field tests of the irrigation equipment, which contains, in 5 spans 265 meters, equipped with I-Wob emitters with a 9-jets rotating plate. To collect water depth applied by the equipment in the irrigated area were used two parallel lines of catch cans distant 5 m and each containing 88 catch cans spaced 3 m from each other. It was observed high uniformity water application equipment even in high wind conditions ($V > 6.00 \text{ ms}^{-1}$). Furthermore, the normal distribution, logistics and Weibull probability is suitably adjusted to the most in-field tests. The range of parameters of normal and logistic distributions have a good explanation in its variation as a function of wind speed, a result not obtained for the Weibull distribution. The models proposed by the scale parameters of the normal distribution and logistics represented properly, the performance of the mechanical lateral move irrigation equipment operating on a rice crop in the south of Rio Grande do Sul.

Keywords: Sprinkle, Wind, Uniformity, I-Wob

Lista de Figuras

Figura 1. Desenho esquemático do equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel de irrigação e a disposição dos coletores para os ensaios de campo.	26
Figura 2. Ambiente da planilha eletrônica Microsoft Excel 2013, confeccionada para determinação da distribuição Weibull.	34
Figura 3. Perfil das lâminas adimensionalizadas ao longo da linha lateral do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel para os ensaios realizados com velocidades de vento inferiores à $2,00 \text{ m.s}^{-1}$	40
Figura 4. Perfil das lâminas adimensionalizadas ao longo da linha lateral do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel para os ensaios realizados com velocidades de vento entre $2,00$ e $4,00 \text{ m.s}^{-1}$	41
Figura 5. Perfil das lâminas adimensionalizadas ao longo da linha lateral do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel para os ensaios realizados com velocidades de vento superiores à $4,00 \text{ m.s}^{-1}$	43
Figura 6. Relação entre os Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) e a velocidade do vento para os 29 ensaios de campo do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel.	44
Figura 7. Relação entre os Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD) e a velocidade do vento para os 29 ensaios de campo do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel.	45
Figura 9. Funções cumulativas de probabilidades (FCP) das distribuições testadas e dos dados observados em campo para os ensaios realizados sob velocidade de vento entre $2,00$ e $4,00 \text{ m.s}^{-1}$	52
Figura 10. Funções cumulativas de probabilidades (FCP) das distribuições testadas e dos dados observados em campo para os ensaios realizados sob velocidade de vento superiores à $4,00 \text{ m.s}^{-1}$	53
Figura 11. Relação entre o parâmetro desvio padrão da distribuição normal de probabilidades (A) e escala da distribuição logística de probabilidades (B) com a velocidade média do vento em cada ensaio realizado no equipamento mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel.	58

Figura 12. Relação entre a velocidade média do vento e os parâmetros de forma (A) e locação (B) da distribuição Weibull de probabilidades.	59
Figura 13. Relação entre os valores observados nos ensaios de campo do CUC (A e C) e da CUD (B e D), com os valores obtidos com a análise de Monte Carlo para a Distribuição Normal de Probabilidades (A e B) e para a Distribuição Logística de Probabilidades (C e D).	60

Lista de Tabelas

Tabela 1. Velocidade do vento, CUC, CUD e parâmetros das distribuições de probabilidade ajustadas para os 29 ensaios de campo.....	47
Tabela 2. Índices de Kolmogorov-Smirnov (KS) para avaliar o ajuste das distribuições testadas para os 29 ensaios de campo	55

Sumário

1	Introdução.....	13
2	Revisão de literatura.....	15
2.1	Uso da água e importância da irrigação.....	15
2.2	Arroz irrigado.....	17
2.3	Irrigação por aspersão	18
2.4	Desempenho de sistemas de irrigação por aspersão	20
2.5	Distribuições de probabilidades	23
3	Metodologia	25
3.1	Equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel	25
3.2	Ensaio de campo.....	25
3.3	Uniformidade de distribuição de água aplicada pelo equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel.....	27
3.4	Modelagem probabilística da lâmina de água aplicada.....	28
3.4.1	Distribuição empírica de probabilidades	28
3.4.2	Distribuição normal de probabilidades.....	29
3.4.3	Distribuição uniforme de probabilidades.....	30
3.4.4	Distribuição gama de probabilidades.....	31
3.4.5	Distribuição Weibull de probabilidades	32
3.4.6	Distribuição Logística de probabilidades	34
3.5	Adequabilidade das distribuições de probabilidade	36
3.6	Validação do modelo proposto.....	37
4	Resultados e Discussão	39
4.1	Perfil de distribuição de água do equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel.....	39
4.2	Uniformidade de aplicação de água.....	44
4.3	Modelagem probabilística da lâmina de água aplicada.....	46
4.4	Adequabilidade das distribuições teóricas de probabilidades	54

4.5	Validação do modelo proposto.....	57
5	Conclusões	62
	Referências bibliográficas	63

1 Introdução

Em um cenário mundial caracterizado pela crescente demanda por água e energia, bem como a preocupação com os impactos ambientais associados aos diversos processos produtivos, a viabilidade econômica e a própria sustentabilidade dos sistemas de irrigação por aspersão ficam na dependência do uso mais eficiente dos recursos hídricos e energéticos disponíveis.

No momento atual, com a necessidade da utilização de técnicas que minimizem o consumo de água na agricultura, a utilização de sistemas mecanizados de irrigação por aspersão, como o pivô central e o lateral móvel, vem ganhando destaque para irrigação da cultura do arroz na região Sul do Brasil, no entanto, é necessário buscar estratégias que permitam elevar a uniformidade de distribuição de água destes sistemas no campo, minimizando assim a utilização de água durante o ciclo produtivo da lavoura arroseira.

Os sistemas mecanizados de irrigação por aspersão do tipo pivô central e lateral móvel destacam-se por possuírem capacidade de atingir elevadas uniformidades de distribuição de água. No entanto, devido à possibilidade de ocorrência de diferentes condições meteorológicas durante o ciclo produtivo da cultura, ou até mesmo durante um único evento de irrigação, a uniformidade de aplicação de água destes sistemas em condições meteorológicas adversas deve ser conhecida por projetistas e irrigantes, otimizando assim o uso da água e, conseqüentemente, o impacto ambiental da agricultura irrigada.

Os fatores que mais afetam a eficiência de funcionamento de um equipamento de irrigação por aspersão podem ser divididos em dois grupos, os fatores intrínsecos ao equipamento e os fatores externos.

Dentre os fatores intrínsecos ao equipamento, destaca-se o padrão de distribuição de água aplicado pelo aspersor utilizado, o espaçamento entre aspersores a altura do solo em que o aspersor está instalado, e, para os equipamentos mecanizados tipo lateral móvel também tem grande relevância o padrão de movimento deste equipamento, pois ele pode levar a alterações no padrão de sobreposição da faixa irrigada.

Já os fatores externos ao equipamento, o que tem maior destaque é o vento, o qual altera o padrão em que a água aspergida pelo equipamento chega ao solo, assim alterando a eficiência de funcionamento do sistema, resultando em uma

fração da área recebendo excesso de água e outra recebendo menor quantidade de água do que o projetado e assim podendo causar estresse hídrico na cultura irrigada.

Desta forma, ressaltando a necessidade de estudos avaliando o efeito do vento em equipamentos de irrigação por aspersão, e, a região sul do Rio Grande do Sul, historicamente, é afetada por ventos de elevadas velocidades, além de que não são conhecidos estudos nesta região avaliando equipamentos de irrigação mecanizada tipo lateral móvel, elevando assim, a importância de avaliar esses equipamentos na região.

Com a finalidade de avaliar qualitativamente e quantitativamente o funcionamento dos sistemas de irrigação por aspersão, surgiram diversos métodos de medidas, por meio de diferentes coeficientes de uniformidade, sendo que todos eles levam em consideração a variação da lâmina aplicada pelo equipamento de irrigação ao longo da área irrigada.

Avaliando-se o perfil de distribuição de água aplicado por um equipamento de irrigação, é possível verificar a fração da área que está recebendo, efetivamente, a lâmina de água projetada, e, também, medir quanto que foi o déficit de irrigação bem como avaliar a parcela da área que recebeu uma lâmina maior que a projetada e estimar estes valores.

Para tornar possível a quantificação desses resultados, podem ser utilizadas distribuições teóricas de probabilidade, as quais, assim que ajustadas ao padrão de distribuição de água aplicada pelo equipamento, por meio de suas funções cumulativas de probabilidades, podem fornecer diversos índices de avaliação da qualidade de funcionamento do equipamento de irrigação.

Sendo assim, este estudo teve por objetivo avaliar um equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel operando em condições de vento, assim como testar a adequabilidade com que as distribuições de probabilidade normal, uniforme, gama, Weibull e logística descrevem a distribuição da lâmina de água aplicada por um equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel utilizado na cultura do arroz, operando em condições de vento na região sul do Rio Grande do Sul, assim como, gerar um modelo para simulação dos parâmetros das distribuições que melhor representarem o perfil da lâmina aplicado pelo equipamento por meio da velocidade média do vento.

2 Revisão de literatura

2.1 Uso da água e importância da irrigação

No ano de 2007, conforme relatado pela FAO (2015), no mundo, a retirada de água foi cerca de 3918 km³, sendo 12% desta parcela destinado ao consumo urbano e rural, 19% destinado ao consumo industrial e o restante (69%) sendo destinado para a agricultura. Nesse mesmo ano, ainda conforme a FAO (2015), a retirada de água no Brasil foi de 74,8 km³, sendo que a atividade que mais retirou água foi a agricultura (60%), sendo o restante divididos entre abastecimento urbano e rural (23%) e abastecimento industrial (17%).

Conforme conjuntura da ANA (2013), do total de água efetivamente consumida no Brasil em 2010, a maior parcela do consumo deste recurso (72%) foi de responsabilidade da agricultura irrigada, sendo seguido pela dessedentação animal (11%), consumo urbano (9%), consumo industrial (7%) e por fim, consumo rural com 1% do total de água utilizado. No Brasil apenas 8,3% da área agrícola é irrigada, demonstrando assim, os altos índices de utilização de água pela agricultura irrigada.

Se comparado com os dados apresentados por Christofidis (2001), no Brasil, no ano de 2001, os cultivos irrigados representavam cerca de 5,8% do total da área agrícola, assim sendo, é possível visualizar um aumento da parcela da área irrigada no Brasil.

Em escala global, a agricultura irrigada é 2,7 vezes maior em termos de produtividade do que a agricultura de sequeiro, que depende da variabilidade temporal e espacial da chuva. Sendo assim, a prática da irrigação possibilita a melhora no manejo da produção e da disponibilidade de água, em termos de quantidade e qualidade (CHRISTOFIDIS, 2013).

De acordo com Christofidis (2008), no Brasil, nas áreas onde se têm a agricultura irrigada, o consumo anual médio de água atinge cerca de 9500 m³ ha⁻¹, sendo este valor fruto da larga utilização de sistemas de irrigação com baixa eficiência e assim, ocasionando elevado desperdício deste recurso.

Melhorar a produtividade da água pode desempenhar um papel fundamental para reduzir a demanda de água na agricultura. Se mantidos os níveis de eficiência de utilização da água e produtividade das culturas obtidos atualmente, no ano de

2050 estima-se que o consumo de água pela agricultura aumentará cerca de 70 a 90% (MOLDEN et al., 2007).

O sistema de irrigação por inundação é o mais utilizado no mundo, porém, devido a sua baixa eficiência no aproveitamento da água, vem sendo empregado, em algumas regiões de cultivo, o método de irrigação por aspersão, que, se manejado corretamente, apresenta maiores índices de eficiência (NOGUÉS & HERRERO, 2003).

Já no Brasil, de acordo com estudo realizado por Paulino et al. (2011), o método de irrigação por aspersão é o mais utilizado, seguido da irrigação por inundação. Entretanto, ainda conforme Paulino et al. (2011), a maior parcela dos sistemas de irrigação por aspersão estão implantados na região sudeste do Brasil, porém, na Região Sul do país há predominância da irrigação por inundação, onde estão localizados cerca de 85% deste sistema, fato esse que é atribuído à extensa área de cultivo do arroz irrigado.

Yacoubi et al. (2012) estudando as condições da Tunísia, afirmam que frente à crescente demanda e competição pelos recursos hídricos, se faz necessária a utilização de sistemas de irrigação com maior eficiência de aplicação da água, e para isso estes autores sugerem a utilização de sistemas de irrigação pressurizados. Os autores ainda ressaltam que, na Tunísia, assim como no Brasil, a irrigação por superfície é o método mais utilizado.

Dentre os sistemas de irrigação por aspersão, o sistema pivô central vem em expansão e tomando um papel de destaque na agricultura irrigada, devido a sua facilidade de operação em áreas com topografia irregular, assim como permite a aplicação de fertirrigação e também possibilita a aplicação de pequenas lâminas com uma alta frequência, desta forma aumentando a vantagem deste sistema frente aos outros (ZOLIN et al., 2012).

No estado do Rio Grande do Sul, do total da área agrícola irrigada, 82,6% utiliza o sistema de irrigação por inundação, sendo que de todos os outros sistemas de irrigação utilizados, seguido pelo sistema por sulcos, assim demonstrando uma forte tendência da utilização, neste estado, do método de irrigação por superfície (PAULINO et al., 2011)

2.2 Arroz irrigado

De acordo com o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística, IBGE (2013), o Brasil, na safra 2012/13, produziu cerca 11,783 milhões de toneladas de arroz, superando em 2,0% a produção obtida na safra de 2011/12. Além disso, o instituto ainda relata que a produtividade média nacional de arroz foi de 5.074 kg.ha⁻¹.

O Rio Grande do Sul é o maior produtor deste cereal, na safra de 2012/13 o estado produziu 8.099.357 toneladas, representando 68,7% da produção nacional, em 1.083.863 ha de área de arroz colhido, e, é o estado que apresenta maior produtividade (7.473 kg.ha⁻¹), predominando nestas áreas os sistemas de irrigação por inundação (IBGE, 2013).

Steinmetz (2004) relata que o Rio Grande do Sul cultiva anualmente cerca de um milhão de hectares de arroz inundado, e utiliza, aproximadamente, por cada safra, cerca de 12.000 m³.ha⁻¹ de água, enfatizando assim o consumo elevado de água das lavouras arrozeiras cultivadas com esse sistema de irrigação.

Conforme descrito por Spanu, Murtas e Ballone (2009), a técnica do arroz irrigado por inundação utiliza uma grande quantidade de água devido perdas por percolação profunda e evaporação, devido à manutenção de uma lâmina de água acima da superfície do solo durante grande parte do ciclo de cultivo da cultura.

Uma medida para reduzir o volume de água utilizado nas lavouras de arroz é substituir o sistema de irrigação por inundação, por um método mais eficiente, como a irrigação por aspersão, que possui índices de perdas de água por percolação e evaporação substancialmente menores do que o sistema de inundação (SPANU, MURTAS e BALLONE, 2009)

Parfitt et al. (2011) afirmam ainda que em lavouras arrozeiras irrigadas por aspersão pode-se obter uma economia de água em torno de 40% a 50%, em comparação com a irrigação por inundação, mantendo-se semelhante os índices de produtividade.

Nesse mesmo sentido, Spanu, Murtas e Ballone (2009) obtiveram como resultados, avaliando a produtividade do arroz irrigado por aspersão na Itália, que o arroz quando irrigado por aspersão traz benefícios ambientais e agrônômicos, além disso, também possibilita uma redução do consumo do recurso hídrico em torno de 50% mantendo a produtividade da cultura.

Conforme apresentado por Crusciol et al. (2000), o arroz irrigado com sistemas de aspersão, permite uma maior produtividade e grãos de maior qualidade que se comparado ao arroz de sequeiro, e também com a estabilidade de produção dessa técnica, possibilita um maior investimento e tecnificação da área, contribuindo assim para aumentar a produtividade da cultura.

Na produção de sementes de arroz, a irrigação por aspersão possibilita, além de uma maior produtividade, a obtenção de sementes com maior qualidade fisiológica se comparados à cultura deste cereal em sequeiro (CRUSCIOL et al., 2012).

De acordo com Opeña et al. (2014), que estudando a irrigação por aspersão na cultura do arroz no sudeste da Ásia, onde é produzido cerca de 30% do total do cereal do mundo, a escassez de novas áreas, água e mão-de-obra tem obrigado, para a manutenção da segurança alimentar daquela região assim como no resto do mundo, a melhorar a produtividade das áreas cultivadas, assim como aumentar a eficiência do uso dos recursos hídricos.

Um problema que vem sendo enfrentado nas áreas onde o arroz é irrigado por aspersão, baseado no potencial em que a água está retida no solo, é a maior competição da cultura com plantas daninhas, porém se a cultura for manejada corretamente este método é capaz de manter a produtividade economizando água e mão-de-obra (OPEÑA et al., 2014).

Kato e Katsura (2014) relatam que o principal problema que se observou na irrigação por aspersão, na cultura do arroz, foi a falta de pesquisas visando o desenvolvimento de variedades da cultura adaptadas à este sistema de irrigação, principalmente no final do século XX. Entretanto, no século XXI, devido à maior importância dada ao uso mais eficiente dos recursos hídricos, tem-se dado mais importância à esse assunto e, segundo os autores, já estão disponíveis diversas variedades capazes de oferecer produtividades semelhantes às irrigadas por inundação.

2.3 Irrigação por aspersão

A irrigação foi desenvolvida, primeiramente para ser utilizada em áreas com declividade menor que 1%, sendo, nessas áreas, adotado o método de irrigação por

gravidade. Porém após a segunda guerra mundial, a irrigação por aspersão começou a tomar maior importância, devido à popularização de motores e bombas, permitindo assim, que áreas com maiores declividades fossem irrigadas (MUSICK, PRINGLE e WALKER, 1988)

A irrigação por aspersão tem por objetivo fornecer água para a cultura, sem que a água escoe superficialmente, e para um bom funcionamento do sistema, a água deve ser distribuída na área irrigada de maneira o mais uniforme possível (CHRISTIANSEN, 1942).

A distribuição de água por sistemas de irrigação por aspersão, conforme descrito por Mateos (1998), se dá em duas etapas, uma é a distribuição do aspersor até o solo ou a superfície da cultura irrigada e outra é a redistribuição da água no interior do perfil do solo.

Equipamentos de irrigação mecanizados tipo pivô central e/ou lateral móvel vêm adquirindo grande importância no cenário da agricultura irrigada, devido à relativa facilidade de operação desses sistemas, assim como controle de lâmina de irrigação, redução dos custos com mão-de-obra e a alta uniformidade de aplicação de água que estes equipamentos conseguem obter (SANDRI e CORTEZ, 2009).

Equipamentos de irrigação por aspersão mecanizados tipo pivôs centrais e laterais moveis estão presentes em grande parte dos novos projetos de irrigação ao redor do mundo, sendo que, originalmente, esses sistemas eram equipados com aspersores do tipo de impacto, os quais operam com alta pressão de serviço (FACI, et al., 2001).

Faci et al. (2001) relatam que os aspersores de impacto, devido à necessidade de redução de custos com energia e a procura de melhores índices de uniformidade de aplicação de água, vêm sendo substituídos por aspersores de baixa pressão de operação, sendo estes divididos em dois grupos principais, aspersores com placa fixa e aspersores com placa oscilante.

As características de desempenho típicas de um sistema mecanizado de irrigação por aspersão com pivô central e lateral móvel incluem a taxa de aplicação de água, a lâmina de água aplicada em relação à velocidade de deslocamento do sistema, a pressão de serviço e sua distribuição ao longo do equipamento, o tamanho e a trajetória das gotas, e os padrões de distribuição do emissor (CLARK et al., 2003).

Beskow et al. (2011) salientam ainda que os sistemas de irrigação por aspersão são amplamente utilizados no Brasil, entretanto, devido a dimensionamentos errados ou utilização em condições climáticas adversas, esses sistemas muitas vezes não operam com a sua máxima eficiência, desperdiçando água, energia e fertilizantes.

A fim de avaliar o funcionamento de equipamentos de irrigação mecanizados tipo pivô central operando em condições de campo, Sandri e Cortez (2009) testaram 16 equipamentos instalados no interior do estado de Goiás, e, obtiveram como resultado que a metade destes equipamentos estavam operando de forma, no máximo, considerada como regular, enfatizando a importância da avaliação de equipamentos instalados e, se necessário, sua readequação para um correto funcionamento.

Ainda conforme observado por Sandri e Cortez (2009), os principais problemas encontrados nos equipamentos de irrigação avaliados foram, dimensionamento equivocado do conjunto moto-bomba, escolha de bocais com diâmetros diferentes aos ideais, assim como problemas técnicos no relé percentual, que comanda a velocidade com que o equipamento se desloca, corroborando assim com a afirmação realizada por Beskow et al. (2011), para equipamentos de irrigação por aspersão convencional.

2.4 Desempenho de sistemas de irrigação por aspersão

Historicamente, a técnica da irrigação começou a ser utilizada com finalidade de garantir a sobrevivência dos povoados, sendo que haviam poucos irrigantes e, também, uma baixa demanda por recursos hídricos de forma geral. Não haviam problemas de competição pela água, porém, com o passar do tempo aumentou a concorrência pela utilização da água, tanto pela expansão das áreas agrícolas irrigadas, como também, para fins de suprimento hídrico para as indústrias e o consumo humano, se fazendo necessário, a adoção de técnicas que elevassem a eficiência da utilização da água por sistemas de irrigação (BURT et al., 1997).

Conforme Burt et al. (1997), os sistemas de irrigação devem otimizar a sua eficiência do uso da água, conciliando com uma boa produtividade da cultura que é irrigada, a fim do produtor rural se manter competitivo, e, para isso, se faz

necessário quantificar, tanto no projeto como em ensaios de campo, o quão eficientemente o sistema de irrigação está operando.

Desta forma, com a crescente ênfase na melhora da qualidade da água e, ao mesmo tempo, no aumento da demanda dos recursos hídricos, Heermann et al. (1992) ressaltam a importância de se utilizar sistemas de irrigação melhores dimensionados e manejados, sendo que, de acordo com estes autores, a uniformidade de distribuição de água aplicada por equipamentos de irrigação é o fator que mais afeta a performance de operação destes equipamentos.

A uniformidade de e aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão é tradicionalmente caracterizada através de coeficientes de uniformidade baseados em medidas da dispersão das lâminas aplicadas ao longo da área, sendo esses coeficientes utilizados para definir a qualidade e a adequabilidade do sistema utilizado para aquelas condições de operação (CHAUDHRY, 1976).

Grande parte das áreas irrigadas ao redor do mundo têm sistemas de irrigação operando com desempenho inferior ao recomendado, e devido a isso, esses sistemas necessitam ter sua eficiência aumentada, com a finalidade de economizar água e energia, e, isso só é possível realizando avaliações de desempenho desses sistemas existentes e a partir destas informações realizar ajustes e melhoras no manejo e na aplicação de água por esses sistemas (TARJUELO, GÓMEZ e PARDO, 1992)

Nesse mesmo sentido, Toromo et al., (2011) ressaltam que o aumento na adoção de sistemas de irrigação por aspersão deve ser amplamente acompanhado, visando a maximização da eficiência da aplicação de água por esses sistemas, e assim, levando à otimização no uso dos recursos hídricos disponíveis.

Sanchez et al. (2011), salientam que para um correto manejo de sistemas de irrigação por aspersão, e a consequente operação destes com adequada eficiência de uso da água, a monitoramento da velocidade e direção do vento é essencial em regiões onde, historicamente, há incidências de ventos com velocidades de moderadas a altas.

Conforme relatado por Kincaid (1996), a redução da uniformidade de aplicação de água aplicada por equipamentos mecanizados de irrigação por aspersão tipo pivô central e/ou lateral móvel é decorrente devido a dois tipos de efeitos, os aleatórios, como, principalmente, a velocidade do vento e variações na velocidade de deslocamento do equipamento, e os cumulativos, como problemas de

dimensionamento do equipamento com relação à topografia e a sobreposição dos raios molhados dos aspersores.

Ainda de acordo com Kincaid (1996), a topografia afeta sistemas tipo pivô central e/ou lateral móvel, este fato pode ser atribuído às alterações da velocidade de deslocamento do equipamento devido ao favorecimento da patinagem nos trechos de subida, reduzindo assim a velocidade de deslocamento e o conseqüente aumento da lâmina aplicada pelo equipamento.

Com relação a velocidade do vento, Yacoubi et al. (2012) encontraram como resultados, avaliando um equipamento de aspersão convencional, que quanto maior a velocidade do vento, menor a uniformidade que o sistema de irrigação aplica água, sendo esse efeito mais sensível para velocidades de vento superiores a 2 m.s^{-1} .

A uniformidade de aplicação de água e as perdas de água por evaporação e arraste são os principais parâmetros utilizados para avaliar equipamentos de irrigação por aspersão, sendo que, usualmente, o parâmetro mais utilizado para avaliar se esses equipamentos estão operando de forma aceitável, ou não, é o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) (STAMBOULI, ZAPATA e FACI, 2014).

Conforme indicado por Tarjuelo, Gómez e Pardo (1992), na avaliação de equipamentos de irrigação por aspersão, valores de CUC iguais ou superiores a 80% são exigidos para serem aceitos como adequados, índices inferiores a esse valor indicam algum problema de projeto e/ou a operação em condições desfavoráveis. Von Bernuth (1983) foi mais além, indicando que esse é o índice mínimo aceitável devido ao fato de que, com CUC inferior à 80%, a área que recebe a porção com menor lâmina, se torna significativa e acarreta em redução da produtividade devido à subirrigação.

De acordo com Zolin et al. (2012), a produtividade de uma cultura e a uniformidade de aplicação de água estão diretamente relacionadas, além disso, quanto mais uniformemente a água for aplicada na área irrigada, menores serão as perdas de água por percolação profunda e a geração de escoamento superficial, assim trazendo assim benefícios econômicos e ambientais.

Porém, como é ressaltado por Walker (1979), quanto mais elevado é a uniformidade de aplicação e a eficiência de um sistema, maior será o seu custo de implantação e operação, entretanto, com elevadas eficiências é possível obter-se

ganhos de produtividade na área assim como economia de fertilizantes e redução do impacto ambiental ocasionado pela prática da irrigação.

2.5 Distribuições de probabilidades

Conhecer as características da distribuição de água aplicada por um equipamento de irrigação é de grande importância para uma correta operação do sistema, assim sendo, diversas distribuições de probabilidade teóricas podem ser utilizadas para descrever a distribuição de água aplicada pelo equipamento de irrigação (ELLIOTT et al., 1980).

A função cumulativa de probabilidades, a qual varia de 0 a 1, pode ser utilizada para indicar a porcentagem da área que está recebendo uma quantidade maior ou menor de água do que aquela requerida pela cultura (ANYOJI & WU, 1994), e, conforme indicado por Hart & Reynolds (1965), utilizando-se a função cumulativa de probabilidades, pode-se determinar a eficiência de aplicação de água para sistemas de irrigação por aspersão.

Hart & Reynolds (1965) indicaram que a distribuição normal de probabilidades descreve adequadamente a distribuição de água aplicada por sistemas de irrigação, além disso, esses autores também propuseram funções capazes de determinar os parâmetros que indicam a eficiência de irrigação a partir dos valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC).

No mesmo sentido, porém utilizando um sistema de irrigação localizada do tipo gotejamento, Anyoji & Wu (1994) indicaram que a distribuição normal de probabilidade representa adequadamente o perfil da lâmina de água aplicada por esse sistema de irrigação. Além disso, estes autores propuseram uma metodologia para avaliar o desempenho da irrigação através do coeficiente de variação de vazão (CV) dos gotejadores ao longo da linha lateral.

Em sistemas de irrigação mecanizado tipo pivô central, Heermann et al. (1992), observaram que a distribuição normal de probabilidade descreve adequadamente (5% de significância) a distribuição de água aplicada por esse equipamento. Os autores afirmam também que, quando equipados com emissores tipo spray de placa fixa a adequação da distribuição normal é mais eficiente que o equipamento estiver utilizando emissores de impacto.

Karmeli (1978) comparando a qualidade com que as distribuições de probabilidades normal e uniforme representaram os perfis de distribuição de água aplicadas por um sistema de irrigação por aspersão convencional observou que, para esses sistemas de irrigação, com elevados índices de uniformidade de aplicação de água, a distribuição uniforme é capaz de estimar a aplicação de água pelo equipamento de irrigação de maneira similar a distribuição normal. Porém, em sistemas com baixa uniformidade de aplicação ($CUC < 55\%$) a distribuição uniforme é a que representa melhor a distribuição de água de sistemas convencionais de irrigação.

Para sistemas de irrigação por aspersão convencional, Chaudhry (1976) afirma que, quando aplicando baixas lâminas de água, a distribuição Gama de probabilidades descreve adequadamente bem o perfil de distribuição de água aplicada.

Warrick, Hart e Yatayew (1989) propuseram uma metodologia para calcular os parâmetros de desempenho de sistemas de irrigação a partir dos parâmetros das distribuições normal, log-normal, uniforme e “specialized power”. Além disso, os autores observaram que estimar estes parâmetros de desempenho através de distribuições teóricas de probabilidades podem gerar resultados melhores quando comparados com medições diretas com os dados obtidos em campo.

Utilizando um equipamento mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel, Dukes (2006) testou a adequabilidade de diversas distribuições teóricas de probabilidade em diferentes condições operacionais do equipamento, e concluiu que, algumas distribuições de probabilidade representam melhor o perfil de aplicação de água do equipamento de irrigação, quando comparadas com a distribuição normal de probabilidades. Ainda assim, o autor salienta que a maior praticidade da distribuição normal faz com que o seu uso seja o mais indicado.

Hart & Reynolds (1965) indicaram uma metodologia para determinar a fração da área que recebe uma determinada lâmina de irrigação, para isso, esses autores utilizaram a função cumulativa de probabilidades da distribuição normal, obtendo-se o valor de área acumulado no intervalo de lâminas de irrigação a ser analisado.

3 Metodologia

3.1 Equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel

Foram realizados ensaios de campo em um sistema de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel, utilizado na irrigação do arroz, instalado no Campo Experimental de Terras Baixas (ETB) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado (CPACT), localizado no município do Capão do Leão – RS (31° 49' 12,75" S; 52° 27' 59" W).

O sistema de irrigação avaliado neste estudo é de fabricação da empresa Valley, e possui, em 5 vãos, 265 m de comprimento, vazão total de 179,96 m³.h⁻¹, emissores de água marca Senninger, modelo I-Wob, bocal número 16 (6,35 mm e 1.313 L h⁻¹) e placa oscilante de 9 jatos.

O conjunto motobomba apresenta a seguinte composição: bomba KSB, modelo MEGANORM 100-250 com vazão de 180 m³.h⁻¹, pressão de 30 mca, potência de 24,69 CV e rendimento de 81%. O motor é da marca MWM Diesel, modelo D229-4 (56 CV), potência total no eixo de 43,39 CV e potência máxima de 52,07 CV. A alimentação elétrica foi fornecida por um gerador de 25 kVA/480v com potência consumida de 18,70 CV.

Os emissores I-Wob, com contrapeso, estavam instalados em tubos flexíveis de descida (pendurais) permanecendo a uma distância de 2,8 m da superfície do solo, espaçados uniformemente entre si em 2,3 m, equipados com reguladores de pressão de 68,9 kPa (10 psi), de acordo com as especificações do fabricante.

3.2 Ensaios de campo

Foram realizados 29 ensaios de distribuição de água do equipamento de irrigação por aspersão mecanizado do tipo lateral móvel seguindo o preconizado nas normas técnicas ASAE S436.1 (ASAE, 1996) e NBR 14244 (ABNT, 1998). Durante os ensaios, o equipamento regulado, em seu percentímetro, para deslocar-se a 32% da sua velocidade máxima, o que resulta, de acordo com a ficha técnica do fabricante, em uma lâmina de água aplicada de 9,0 mm.

A uniformidade de distribuição de água foi avaliada em duas linhas paralelas de coletores (LA e LB) regularmente espaçadas em 5 m, sendo os coletores utilizados fabricados pela Fabrimar, com as seguintes dimensões: 8,0 cm de diâmetro interno e 8,0 cm de altura e foram instalados a 70 cm de altura da superfície do solo e espaçados uniformemente em 3 m ao longo da linha lateral do equipamento (Figura 1A). Os volumes de água observados em cada coletor, dispostos nas linhas paralelas LA e LB, foram mensurados por meio de provetas de vidro graduadas de 100 mL com precisão de $\pm 1\%$.

As variáveis meteorológicas, velocidade do vento, direção relativa do vento, umidade relativa do ar e temperatura do ar, foram registradas durante os ensaios de campo, que ocorreram no período diurno, por meio de uma estação meteorológica portátil, marca Davis, modelo Vantage Pro2. Os sensores da estação foram instalados a uma altura de 2 m em relação à superfície do solo, e a uma distância de 50 m da área irrigada, e foi programada para armazenar, em intervalos regulares de 1 minuto, os valores médios de temperatura e umidade relativa do ar, e velocidade e direção do vento.

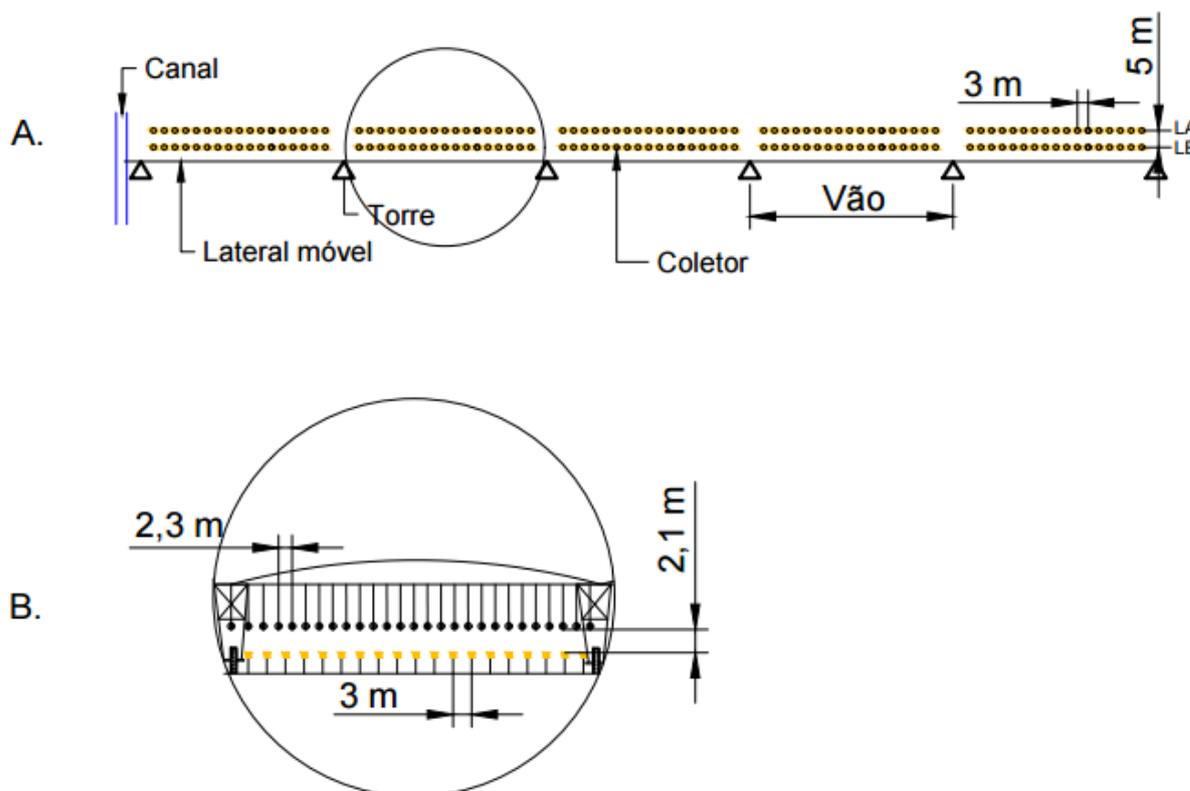


Figura 1. Desenho esquemático do equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel de irrigação e a disposição dos coletores para os ensaios de campo.

3.3 Uniformidade de distribuição de água aplicada pelo equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel

Seguindo recomendação de Karmeli (1978), as lâminas coletadas nos ensaios de campo do sistema mecanizado de irrigação tipo lateral móvel foram adimensionalizadas, dividindo-se a lâmina coletada em cada coletor pela lâmina média coletada no referido ensaio.

Na determinação da uniformidade de distribuição de água do equipamento de irrigação, foram utilizados dois métodos quantitativos: o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Equação 1, preconizado nas normas técnicas S436.1 (ASAE, 1996) e NBR 14244 (ABNT, 1998), e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição, Equação 2, proposto por Criddle et al. (1956).

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

em que:

CUC – Coeficiente de uniformidade de Christiansen, %;

X_i – lâmina adimensionalizada obtida no coletor de ordem i ;

\bar{X} – média aritmética das lâminas coletadas adimensionalizadas;

n - número de coletores.

$$CUD = \left(\frac{\bar{X}_{25\%}}{\bar{X}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

em que:

CUD – Coeficiente de uniformidade de distribuição, %

$X_{25\%}$ – lâmina média adimensionalizada dos 25% dos menores valores coletados;

\bar{X} – média aritmética das lâminas coletadas adimensionalizadas.

3.4 Modelagem probabilística da lâmina de água aplicada

Para realizar a modelagem probabilística da lâmina de água aplicada pelo equipamento de irrigação tipo lateral móvel foram seguidas as metodologias propostas por Karmeli (1978), Heermann et al. (1992) e Dukes (2006), os quais sugerem ajustar o perfil de água aplicada pelo equipamento de irrigação às distribuições teóricas de probabilidades.

Nesse intuito, foram realizados ajustes para as distribuições normal, uniforme, gama, weibull e logística de probabilidades, as quais são as mais testadas em irrigação (HART & REYNOLDS, 1965; KARMELI, 1978; WARRICK, 1983; WARRICK et al., 1989; HEERMANN et al., 1992; ANYOJI & WU, 1994; DUKES 2006).

3.4.1 Distribuição empírica de probabilidades

A distribuição empírica de probabilidades das lâminas observadas nos ensaios de campo, foi utilizada para verificar a adequabilidade do ajuste das distribuições teóricas de probabilidades.

Para determinar a posição de plotagem dos conjuntos de lâminas coletadas nos ensaios de campo do equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel, foi utilizada a equação de Weibull, Equação 3, conforme indicado por Stedinger, Vogel e Foufoula-Georgiou (1993).

$$q = \frac{i}{n+1} \quad (3)$$

Em que:

q – Probabilidade empírica de não excedência da lâmina X_i ;

i – Posição da lâmina X_i ordenado de maneira crescente (1, ..., 88)

n – Tamanho da amostra (n=88).

Este método de determinação da posição de plotagem apresenta como principal característica a boa adaptabilidade à todas distribuições teóricas de probabilidade testadas, assim, não gerando resultados distorcidos sobre a

adequabilidade do ajuste das diferentes distribuições testadas (STEDINGER, VOGEL e FOUFOULA-GEORGIU, 1993).

3.4.2 Distribuição normal de probabilidades

A distribuição normal de probabilidades foi utilizada para descrever o comportamento da lâmina adimensionalizada coletada, e, sendo esta tratada como a variável aleatória da distribuição teórica de probabilidade, que possui variabilidade simétrica, com uma determinada amplitude (Desvio Padrão) em torno de um valor central (média), de acordo com o descrito Naghettini e Pinto (2007).

A função densidade de probabilidade (FDP) da distribuição normal é escrita conforme apresentado na Equação 4, já a função cumulativa de probabilidade (FCP) desta distribuição não possui solução analítica, e, esta função, é o resultado da integração da FDP de infinito negativo até x , sendo x o valor da variável aleatória, resultando assim na probabilidade do valor obtido nessa integração ser menor ou igual ao à “ x ”.

$$FDP_{\text{Normal}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\cdot\pi}} \cdot e^{-0,5 \cdot \left[\frac{(X_i - \mu)}{\sigma}\right]^2} \quad (4)$$

Em que:

FDP_{Normal} – Função densidade de probabilidade da distribuição normal;

μ – Parâmetro de Locação;

σ - Parâmetro de Escala;

X_i – Lâmina coletada no coletor “i”.

Os parâmetros de locação e de escala (Equação 4) da distribuição normal de probabilidade, foram estimados através método da máxima verossimilhança (MMV), conforme sugerido por Naghettini e Pinto (2007), sendo que, este método consiste, para o parâmetro de locação, igualá-lo com a média do conjunto de dados e o parâmetro de escala com o desvio padrão das lâminas observadas no referido ensaio de campo do equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel.

Para a estimativa dos parâmetros da distribuição normal de probabilidades, foi utilizado a planilha eletrônica Microsoft Excel 2013, através dos comandos de “média” e “DesvPad.A” da série de dados, para os parâmetros de locação e escala, respectivamente, e, para aplicar a FCP da distribuição normal foi usado o comando “Dist.Normal” foi utilizado nesse estudo.

3.4.3 Distribuição uniforme de probabilidades

A distribuição uniforme de probabilidades, a qual tem como principal característica considerar que qualquer valor dentro de um intervalo da lâminas observadas nos ensaios de campo, possui a mesma probabilidade de ocorrência, ou seja, as variáveis aleatórias (lâminas coletadas) estão distribuídas uniformemente (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

As funções de densidade (FDP) e cumulativa (FCP) da distribuição uniforme de probabilidades, são apresentadas nas Equações 5 e 6, respectivamente, tendo elas como intervalo de dados os intervalos fechados entre a e b, sendo elas aplicadas na planilha eletrônica Microsoft Excel 2013, aplicando as respectivas equações.

$$FDP_{\text{Uniforme}} = \frac{1}{b-a} \quad (5)$$

$$FCP_{\text{Uniforme}} = \frac{x_i - a}{b-a} \quad (6)$$

Em que:

FDP_{Uniforme} – Função densidade de probabilidade da distribuição uniforme;

FCP_{Uniforme} – Função cumulativa de probabilidade da distribuição uniforme;

a – Mínima lâmina adimensionalizada observada;

b – Máxima lâmina adimensionalizada observada;

x_i – Lâmina adimensionalizada de ordem i.

Os parâmetros a e b da distribuição uniforme de probabilidades foi utilizado o método da máxima verossimilhança (MMV), o qual é descrito por Naghettini e Pinto (2007). Este método de estimação dos parâmetros desta distribuição consiste igualar o parâmetro “a” e o parâmetro “b” ao menor e maior valor, respectivamente, observado nas lâminas coletadas no respectivo ensaio de campo, e para isso foi utilizado o auxílio das funções “Máximo” e “Mínimo” da planilha eletrônica Microsoft Excel 2013.

3.4.4 Distribuição gama de probabilidades

Conforme descrito por Naghettini e Pinto (2007), a distribuição gama de probabilidade é amplamente utilizada devido a ampla diversidade de formas que a sua função densidade de probabilidade (FDP) assume, assim, representando adequadamente diversos conjunto de dados oriundos de diferentes fenômenos. Além disso, essa distribuição foi testada devido ao fato de, em irrigação, se trabalhar com valores positivos, restringindo assim automaticamente valores inferiores a 0.

A função densidade de probabilidade (FDP) da função gama está descrita na Equação 7, e, como a integração desta função não possui solução analítica, a função cumulativa de probabilidade se resume a integral da Equação 7, variando de 0 até x, e para a avaliação neste estudo foi aplicada a função “Dist.Gama” da planilha eletrônica Microsoft Excel 2013.

$$FDP_{\text{Gama}} = \frac{1}{\beta^{\alpha} \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot X_i^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{X_i}{\beta}} \quad (7)$$

Em que:

FDP_{Gama} – Função densidade de probabilidade da distribuição gama;

β – Parâmetro de Escala;

α - Parâmetro de Forma;

Γ – Função Gama;

X_i – Lâmina coletada no coletor “i”.

Os parâmetros de escala e de forma da distribuição Gama, foram estimados utilizando-se a planilha eletrônica Microsoft Excel 2013, por meio do método da máxima verossimilhança (MMV), utilizando a metodologia sugerida por Thom (1958), que se baseia na estimativa dos parâmetros a partir da solução das seguintes equações (Equações 8, 9, 10, 11).

$$\alpha = \frac{1}{4A} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (9)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - x_g \quad (10)$$

$$x_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (11)$$

Em que:

β – Parâmetro de Escala;

α – Parâmetro de Forma;

n – Número de lâminas coletadas adimensionalizadas;

X_g – Média geométrica das lâminas adimensionalizadas;

\bar{x} – Média aritmética das lâminas adimensionalizadas.

3.4.5 Distribuição Weibull de probabilidades

Na aplicação da distribuição Weibull, a qual é, de acordo com Mello e Silva (2013), uma distribuição assintótica de valores extremos Tipo III, e função exponencial com limite inferior, sua FDP é descrita conforme a Equação 12 e a sua função cumulativa descrita conforme a Equação 13, na forma de probabilidade de não-excedência de x .

Para a aplicação da distribuição Weibull de probabilidades, foi utilizada a planilha eletrônica Microsoft Excel 2013, Figura 2, aplicando-se diretamente as Equações 12 e 13, utilizando-se os parâmetros determinados e as lâminas observadas nos ensaios de campo do equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel.

$$FDP_{Weibull} = \lambda \cdot \beta \cdot x_i^{\beta-1} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i^\beta} \quad (12)$$

$$FCP_{Weibull} = 1 - e^{-\lambda \cdot x_i^\beta} \quad (13)$$

Em que:

λ – Parâmetro de locação;

β – Parâmetro de forma;

x_i - Lâmina coletada no coletor “i”.

Na estimativa dos parâmetros β e λ , foi utilizado o método de máxima verossimilhança, e, conforme descrito por Mello e Silva (2013), a sua estimativa é baseada no conjunto de Equações 14 e 15. Para isso, com a planilha eletrônica Microsoft Excel 2013, Figura 2, através da ferramenta “Solver”, configurada com o método “GRG não-linear” para o método de aproximação numérica dos resultados.

$$\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n x_i^\beta} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{n}{\lambda \cdot \sum_{i=1}^n (x_i^\beta \cdot \ln(x_i)) - \sum_{i=1}^n \ln(x_i)} \quad (15)$$

Em que:

n – Número de coletores;

x_i - Lâmina coletada no coletor “i”;

λ – Parâmetro de locação;

β – Parâmetro de forma.

No ambiente da planilha eletrônica, para a resolução do conjunto de equações indicadas para determinar os parâmetros da distribuição Weibull de probabilidades, em um primeiro momento foi substituída a Equação 14 na Equação 15, assim determinando-se o parâmetro β e, posteriormente, com este parâmetro determinado, foi determinado o parâmetro λ na Equação 14, e o ambiente da planilha eletrônica onde foram realizadas as estimações de parâmetros está ilustrado na Figura 2.

Sendo mostrado na Figura 2, após substituição da Equação 14 na Equação 15, e assim, aproximando os dois lados da igualdade da equação substituída (Células L7 e O2), apresentando o resultado minimizado por meio da ferramenta “Solver”, conforme explicado anteriormente, na célula N7.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	N	Lâmina adimensionalizada	Ln (xi)	xi ^beta	C * D	Weibull	Empírica	KS	KS	Soma Ln (xi)	Soma E	soma (xi^beta)			Beta	Lambda	N
2	1	0,594981147	-0,51923	0,002728	-0,00142	0,001751	0,011236	0,009485	0,131829	-0,41173096	11,40374	136,962622			11,37133	0,642511	88
3	2	0,732284488	-0,31159	0,028922	-0,00901	0,018411	0,022472	0,004061									
4	3	0,778052269	-0,25096	0,057627	-0,01446	0,036349	0,033708	0,002641									
5	4	0,800936159	-0,22197	0,080127	-0,01779	0,05018	0,044944	0,005236									
6	5	0,86958783	-0,13974	0,204133	-0,02852	0,122921	0,05618	0,066741									
7	6	0,881029775	-0,12666	0,236848	-0,03	0,141164	0,067416	0,073748				Beta		Abs(Lado esq - Lado dir)			
8	7	0,881029775	-0,12666	0,236848	-0,03	0,141164	0,078652	0,062513				11,37132841		2,36E-09			
9	8	0,903913665	-0,10102	0,317034	-0,03203	0,184291	0,089888	0,094403									
10	9	0,903913665	-0,10102	0,317034	-0,03203	0,184291	0,101124	0,083167									
11	10	0,91535561	-0,08844	0,365785	-0,03235	0,209446	0,11236	0,097086									
12	11	0,926797556	-0,07602	0,421283	-0,03203	0,237139	0,123596	0,113543									
13	12	0,926797556	-0,07602	0,421283	-0,03203	0,237139	0,134831	0,102307									
14	13	0,938239501	-0,06375	0,484362	-0,03088	0,267439	0,146067	0,121371									
15	14	0,938239501	-0,06375	0,484362	-0,03088	0,267439	0,157303	0,110135									
16	15	0,949681446	-0,05163	0,555945	-0,0287	0,300368	0,168539	0,131829									
17	16	0,949681446	-0,05163	0,555945	-0,0287	0,300368	0,179775	0,120593									
18	17	0,949681446	-0,05163	0,555945	-0,0287	0,300368	0,191011	0,109357									
19	18	0,949681446	-0,05163	0,555945	-0,0287	0,300368	0,202247	0,098121									
20	19	0,949681446	-0,05163	0,555945	-0,0287	0,300368	0,213483	0,086885									
21	20	0,949681446	-0,05163	0,555945	-0,0287	0,300368	0,224719	0,075649									
22	21	0,961123391	-0,03965	0,637054	-0,02526	0,335894	0,235955	0,099939									
23	22	0,961123391	-0,03965	0,637054	-0,02526	0,335894	0,247191	0,088703									

Figura 2. Ambiente da planilha eletrônica Microsoft Excel 2013, confeccionada para determinação da distribuição Weibull.

3.4.6 Distribuição Logística de probabilidades

Na aplicabilidade da distribuição logística de probabilidades, a qual possui similaridade como a distribuição normal, possuindo também parâmetros de localização e de escala, entretanto com caudas mais grossas e maior curtose do que a distribuição normal de probabilidades, foi empregada a Equação 16. Esta equação

demonstra a função densidade de probabilidade da distribuição logística ($FDP_{Logística}$), onde μ é o parâmetro de locação e k é o parâmetro de escala, já na Equação 17 é apresentada a função cumulativa de probabilidades da distribuição logística ($FCP_{Logística}$), sendo as referidas equações utilizadas na planilha eletrônica Microsoft Excel 2013.

$$FDP_{Logística} = \frac{e^{\left(-\frac{x-\mu}{k}\right)}}{k \cdot \left(1 + e^{\left(-\frac{x-\mu}{k}\right)}\right)^2} \quad (16)$$

$$FCP_{Logística} = \frac{1}{1 + e^{\left(-\frac{x_i-\mu}{k}\right)}} \quad (17)$$

Em que:

μ - parâmetro de locação;

k - parâmetro de escala;

x_i - Lâmina coletada no coletor "i";

Os parâmetros desta distribuição também foram determinados pelo método da máxima verossimilhança (MMV), sendo o parâmetro de locação (μ) como a média aritmética da população observada, já o parâmetro de escala (k) foi determinado seguindo a Equação 18.

$$k = \frac{\sigma \cdot \sqrt{3}}{\pi} \quad (18)$$

Em que:

σ – Desvio padrão da amostra.

3.5 Adequabilidade das distribuições de probabilidade

Para a verificação do grau de adequabilidade com que as distribuições teóricas de probabilidades representaram os dados observados nos ensaios de campo do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel, foi aplicado o teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (KS), que de acordo com Heermann et al. (1992), é o teste que melhor avalia a adequabilidade das distribuições de probabilidades teóricas, ajustadas às lâminas coletadas em ensaios de campo de equipamentos de irrigação.

Fato esse pode ser atribuído, de acordo com Lima, Vidal e Suslick (2006), pelo motivo do teste de KS ser independente do número de classes, e, se concentrar em comparar o centro dos dados amostrais como o centro de uma distribuição teórica, não capturando, assim, as discrepâncias das extremidades.

O teste de KS consiste em mensurar a maior diferença observada entre a distribuição empírica e a FCP da distribuição teórica de probabilidades testada, conforme descrito na Equação 16.

$$KS = \max |q(x) - FCP(x)| \quad (19)$$

Em que:

KS – máxima diferença entre a distribuição empírica observada e a FCP da distribuição testada

$q(x)$ – Probabilidade de não-excedência da função empírica na lâmina x

$FCP(x)$ – Probabilidade de não excedência da FCP da distribuição teórica testada na lâmina x

Conforme indicado por Heermann et al. (1992), neste estudo foi utilizado um nível de significância de 5% como parâmetro para definir se a distribuição se ajustou adequadamente, ou não, aos dados observados nos ensaios de campo. Para definir o valor de KS máximo (KS_{\max}), foi utilizada a Equação 17, proposta por Naghettini e Pinto (2007).

$$KS_{\text{máx}} = \frac{1,3581}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

Em que:

n – Número de coletores em cada ensaio de campo (n = 88).

3.6 Validação do modelo proposto

A fim de avaliar os modelos propostos, que relacionam a velocidade do vento com os parâmetros das distribuições que melhor se ajustaram aos ensaios de campo do equipamento de irrigação por aspersão mecanizado do tipo lateral móvel, foi utilizada a análise de Monte Carlo, a partir dos parâmetros obtidos através dos modelos, conforme sugerido por Dukes (2006).

Com base nos modelos de determinação dos parâmetros de cada distribuição, estimou-se, através da velocidade do vento durante cada um dos 29 ensaios de campo, os valores dos parâmetros das distribuições; e, então, foram simulados 88 coletores de água, 10 000 vezes, para cada uma das 29 condições observadas, conforme recomendado pelo manual do usuário Crystal Ball (2013).

Na validação e adequabilidade dos modelos propostos, foi utilizada metodologia descrita por Dukes (2006), comparando os valores dos coeficientes de uniformidade (CUC e CUD) observados a partir dos 29 ensaios de campo, com os valores médios dos CUC e CUD oriundos das simulações realizadas para cada condição em que cada um dos ensaios de campo foram realizados.

O desempenho destes modelos foi avaliado por meio de diferentes coeficientes: i) o índice de confiança e desempenho (c), Equação 21, proposto por Camargo & Sentelhas (1997), o qual é obtido pela multiplicação do coeficiente de correlação (r) pelo índice de Willmott (d), Equação 22; ii) raiz do erro quadrático médio (RMSE), Equação 23.

$$c = r \cdot d \quad (21)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{NE} (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (22)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NE} (O_i - P_i)^2}{NE}} \quad (23)$$

em que:

O_i – valor de uniformidade (CUC ou CUD) calculados com os dados observados para o “i” éximo ensaio de campo;

P_i – valor de uniformidade (CUC ou CUD) simulados para o “i” éximo ensaio;

NE – número de ensaios de campo (NE = 29).

O índice de confiança e desempenho (c) foi avaliado segundo escala proposta por Camargo & Sentelhas (1997), sendo: Ótimo ($c > 0,85$); Muito Bom ($0,76 \leq c \leq 0,85$); Bom ($0,66 \leq c \leq 0,75$); Mediano ($0,61 \leq c \leq 0,65$); Sofrível ($0,51 \leq c \leq 0,60$); Mau ($0,41 \leq c \leq 0,50$); e Péssimo ($c \leq 0,40$).

4 Resultados e Discussão

4.1 Perfil de distribuição de água do equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel

O perfil de distribuição de água ao longo do equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel, para os 29 ensaios de campo, foram agrupados conforme a velocidade média do vento durante cada um dos ensaios, sendo estes divididos em três grupos. Na primeira classe foram agrupados os ensaios com velocidades de vento menores do que $2,00 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 3), a segunda classe para ensaios com velocidades de vento entre $2,00$ e $4,00 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 4) e a terceira classe de ensaios para velocidades do vento média superior à $4,00 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 5).

Na Figura 3 está apresentado o perfil das lâminas adimensionalizadas ao longo da linha lateral do equipamento de irrigação por aspersão mecanizado do tipo lateral móvel para os ensaios com velocidades de vento inferiores à $2,00 \text{ m.s}^{-1}$.

As lâminas adimensionalizadas, para os 15 ensaios de campo realizados com velocidades de vento inferiores à $2,00 \text{ m.s}^{-1}$, tiveram como variação valores entre 0,8 a 1,2 vezes a lâmina média coletada no ensaio (Figura 3), resultando em uma amplitude máxima 0,4 vezes a lâmina média coletada. Os resultados observados na Figura 3 foram semelhantes aos obtidos por Dukes (2006), avaliando um equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel, equipado com emissores tipo I-Wob, o qual também observou, para velocidades de vento inferiores à $2,00 \text{ m.s}^{-1}$, uma pequena variação na lâmina aplicada ao longo do perfil longitudinal do equipamento.

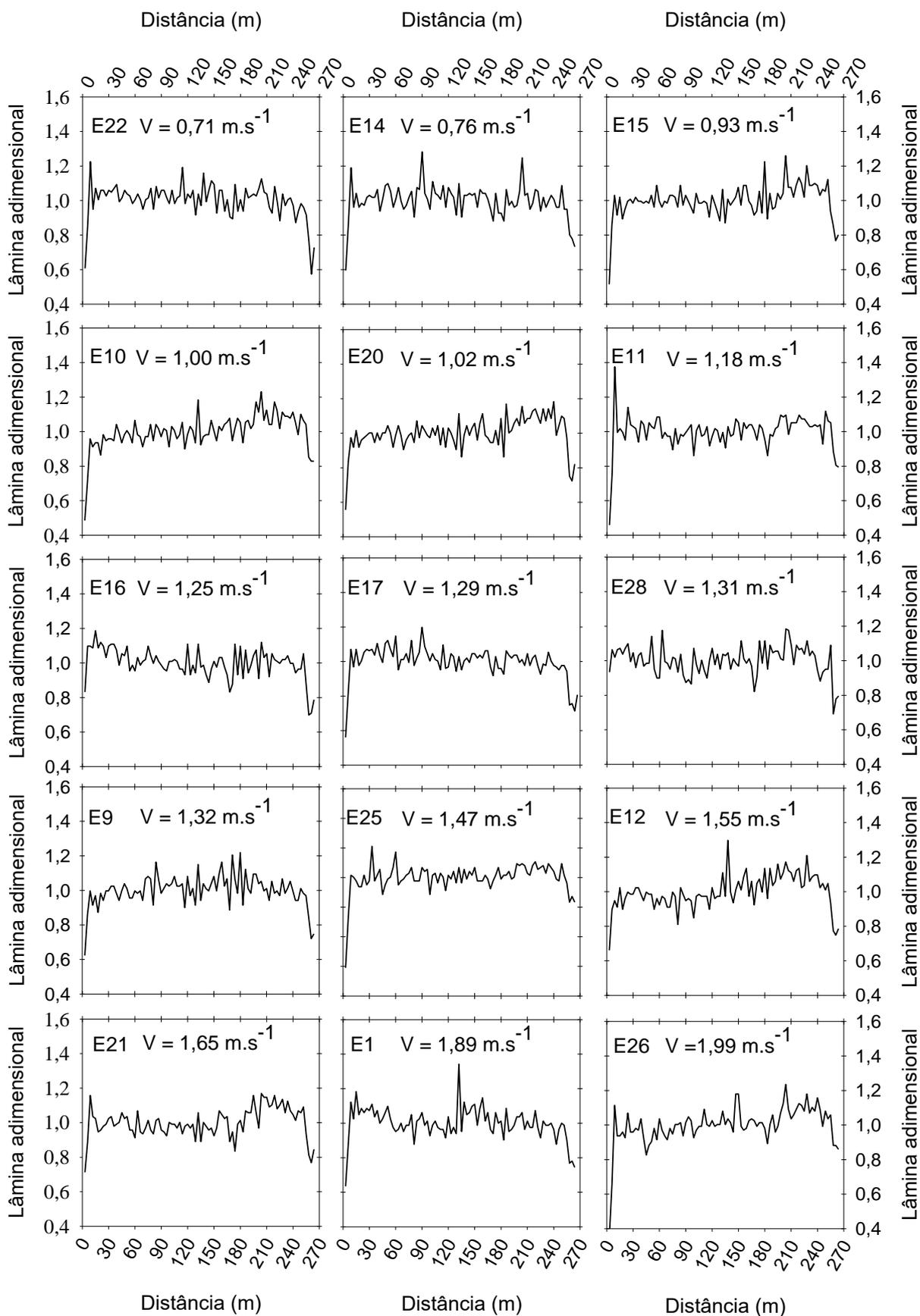


Figura 3. Perfil das lâminas adimensionalizadas ao longo da linha lateral do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel para os ensaios realizados com velocidades de vento inferiores à $2,00 \text{ m.s}^{-1}$.

Na Figura 4 está apresentado o perfil das lâminas adimensionalizadas ao longo da linha lateral do equipamento de irrigação por aspersão mecanizado do tipo lateral móvel para os ensaios realizados com velocidades de vento variando entre 2,00 e 4,00 m.s⁻¹.

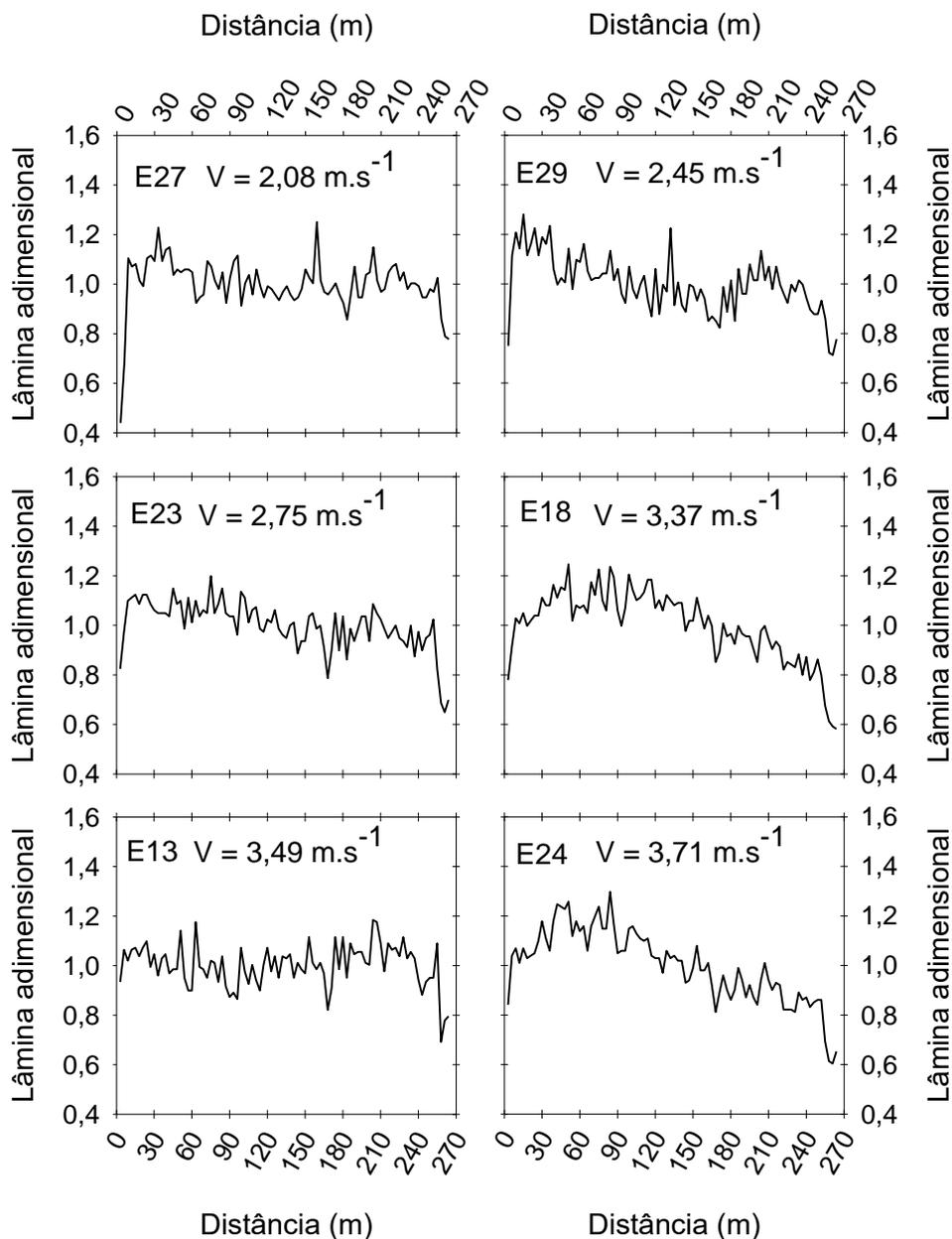


Figura 4. Perfil das lâminas adimensionalizadas ao longo da linha lateral do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel para os ensaios realizados com velocidades de vento entre 2,00 e 4,00 m.s⁻¹.

Na Figura 4 é possível verificar que a distribuição da água foi mais desuniforme ao longo do perfil de água aplicada pelo equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel, se comparada com a Figura 3, a qual foi realizada em condições de velocidade de vento inferiores à $2,00 \text{ m.s}^{-1}$.

Entretanto, é possível verificar que a amplitude de variação da lâmina relativa, para os 6 ensaios de campo realizados com velocidades entre $2,00$ e $4,00 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 4), manteve-se entre a faixa de 0,8 a 1,2 vezes a lâmina média coletada. Esse valor obtido é consideravelmente menor do que o observado por Clark et al. (2003), que obtiveram, para velocidades de vento variando entre $2,00$ e $4,00 \text{ m.s}^{-1}$, utilizando diversas combinações de espaçamentos e tamanhos de bocais em aspersores modelo LDN equipadas em 3 pivôs centrais e um lateral móvel, lâminas variando entre 0,6 e 1,6 vezes a lâmina média dos ensaios de campo, resultando em na amplitude de 1,0 vez a lâmina média aplicada.

Na Figura 5, aonde é apresentado o perfil das lâminas adimensionalizadas ao longo da linha lateral do equipamento para os ensaios realizados com velocidades de vento superiores à $4,00 \text{ m.s}^{-1}$, observa-se especialmente nos ensaios E4, E2 e E8, a maior deformação do perfil de distribuição de água aplicada pelo equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel, sendo que a lâmina adimensionalizada variou entre 0,8 a 1,4, resultados estes superiores aos observados por Clark et al. (2003), o qual operou em uma faixa de velocidades de vento inferiores aos observados neste estudo, indicando que o conjunto aspersor, bocal e espaçamento do equipamento avaliado oferece uma melhor uniformidade de aplicação de água.

Resultado esse reforçado se comparado aos obtidos por Heermann et al. (1992), os quais, testando aspersores de impacto e de spray, também observaram uma maior variabilidade da lâmina, ressaltando a boa adequabilidade dos aspersores tipo I-Wob mesmo operando em elevadas velocidades de vento.

Em um equipamento lateral móvel, equipado com emissores tipo I-Wob, operando com velocidades de vento superiores à $5,00 \text{ m.s}^{-1}$, Dukes (2006) obteve uma amplitude da lâmina aplicada ao longo do perfil longitudinal do equipamento de aproximadamente 0,7 vezes a lâmina média aplicada, resultado esse compatível com os obtidos neste estudo.

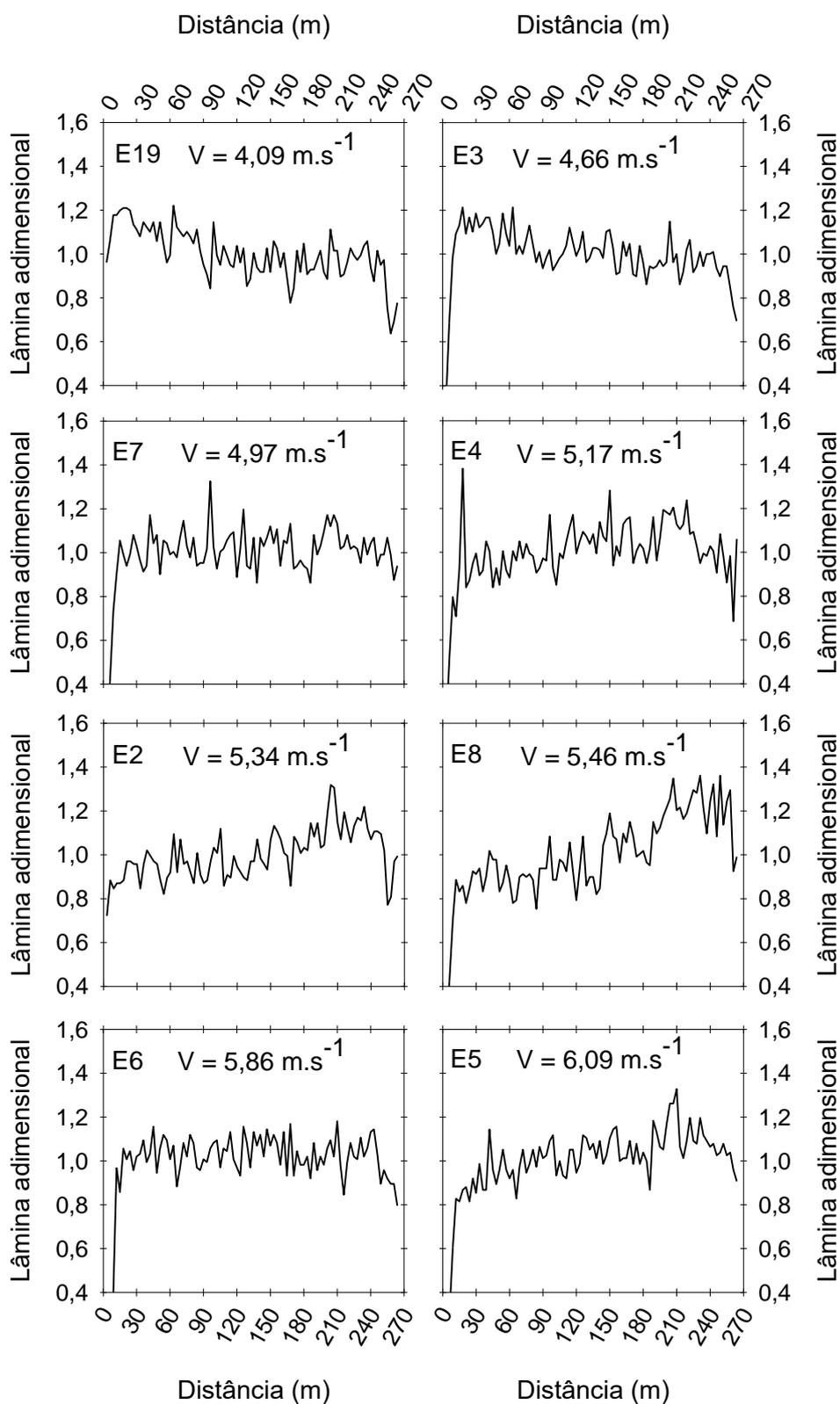


Figura 5. Perfil das lâminas adimensionalizadas ao longo da linha lateral do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel para os ensaios realizados com velocidades de vento superiores à $4,00 \text{ m.s}^{-1}$.

4.2 Uniformidade de aplicação de água

Na Figura 6, são apresentados os valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) em função da velocidade média do vento para cada um dos 29 ensaios de campo realizados no equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel.

Conforme indicado na Figura 6, ocorre a redução dos valores de CUC com o incremento na velocidade do vento, comportamento também observado por Tarjuelo et al. (1999) e Faria et al. (2009), para sistemas convencionais de irrigação, e por Heermann et al. (1992) e Kincaid (1996), para sistemas de irrigação por aspersão do tipo pivô central.

Corroborando com os resultados obtidos por Tarjuelo et al. (1999), Dechmi et al. (2003) e Yacoubi et al. (2010), verificou-se que a influência da velocidade do vento foi bem explicada por uma equação polinomial de terceira ordem. Além disso, verifica-se também que, para velocidades de vento superiores à 5,00 m.s⁻¹, os valores de CUC tem tendência de se manter linear, resultado este também observado por Tarjuelo et al. (1999).

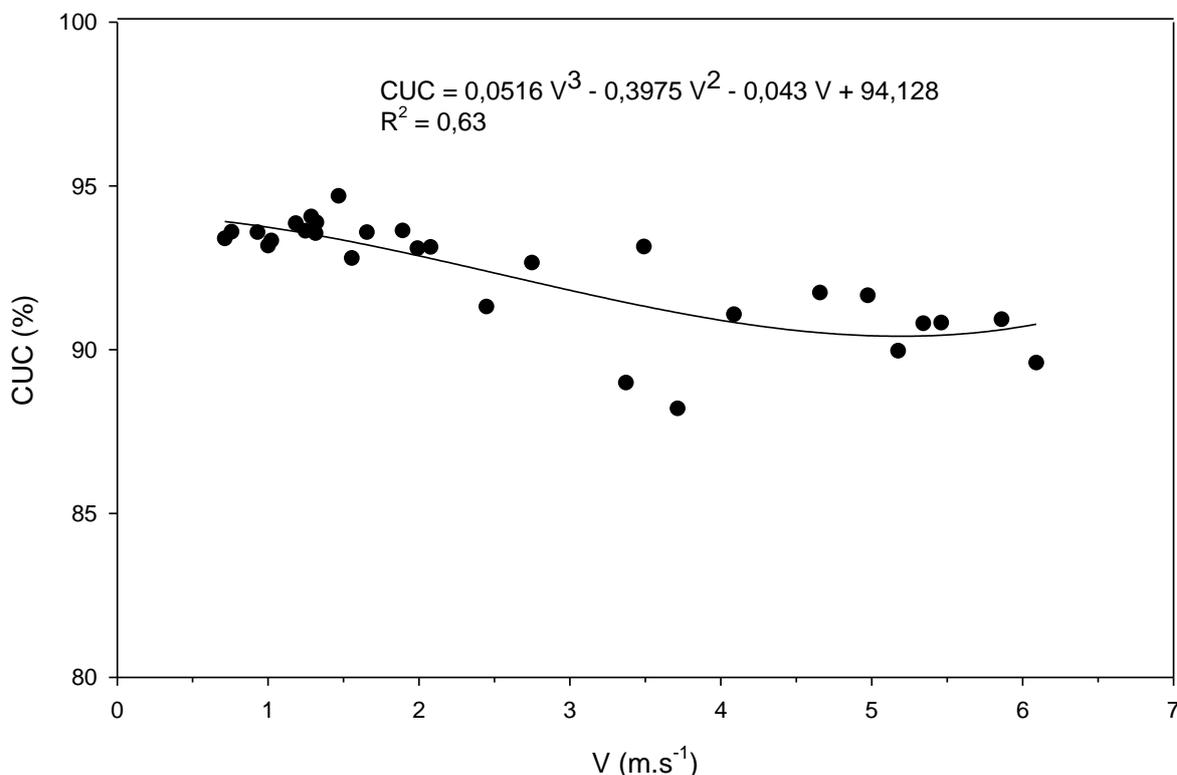


Figura 6. Relação entre os Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) e a velocidade do vento para os 29 ensaios de campo do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel.

Já na Figura 7 é apresentada a relação entre a velocidade média do vento e os valores do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), para os 29 ensaios de campo realizados no equipamento de irrigação.

Assim como observado para o CUC (Figura 6), a relação entre o CUD e a velocidade do vento foi adequadamente explicada por uma equação polinomial de terceira ordem (Figura 7), estando assim de acordo com os resultados obtidos por Tarjuelo et al. (1999), Dechmi et al. (2003) e Yacoubi et al. (2010), em ensaios de sistemas convencionais de irrigação por aspersão.

Entretanto, cabe salientar que os valores obtidos neste trabalho, para o Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD), foram substancialmente maiores do que os obtidos por Tarjuelo et al. (1999), indicando também, uma menor influência do vento na uniformidade de distribuição de água no equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel, se comparado ao sistema convencional testado por Tarjuelo et al. (1999).

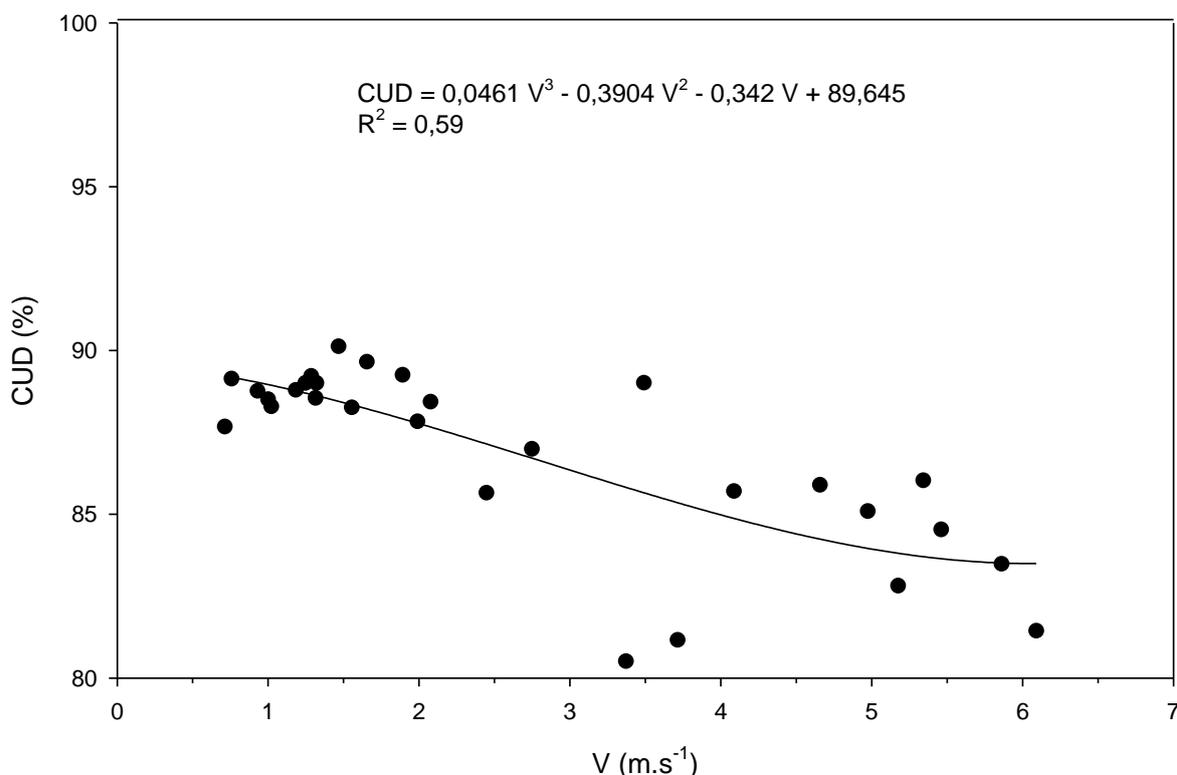


Figura 7. Relação entre os Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD) e a velocidade do vento para os 29 ensaios de campo do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel.

Corroborando com os resultados encontrados por Faci et al. (2001), neste estudo foi observado que o padrão de distribuição da água sobre a área irrigada,

com elevadas velocidades de vento, aplicada por emissores de placa oscilante não sofre grande influência, apenas desloca do centro para o sentido predominante do vento, o padrão de distribuição da água aplicada, o que minimiza a influência negativa deste fator na uniformidade de distribuição de água.

4.3 Modelagem probabilística da lâmina de água aplicada

Na Tabela 1 são apresentados os valores dos Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD), da velocidade do vento (V) e os parâmetros das distribuições ajustadas para os 29 ensaios de campo do equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel.

Nota-se que os valores de CUC variaram entre 88,21% e 94,7% e os de CUD entre 80,52% e 90,13% (Tabela 1), sendo esses valores substancialmente maiores do que os observados por Clark et al. (2003), que obtiveram como resultados dos CUC entre 78% e 90%, em ensaios de campo utilizando sistemas mecanizados tipo pivô central e lateral móvel equipados com emissores Senninger modelo LDN.

Resultados semelhantes foram obtidos por Dukes (2006), que avaliou um equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel equipado com emissores modelo I-Wob e LDN. Para a situação do equipamento de irrigação operando com aspersores modelo I-Wob, os valores de CUC foram semelhantes aos obtidos neste trabalho (CUC variando entre 88 e 93%), enquanto que os valores de CUD obtidos pelo referido autor foram inferiores (CUD variando entre 80 e 81%) aos observados no presente estudo.

Faci et al. (2001) afirmam que os valores dos coeficientes de uniformidade para pivôs centrais e/ou laterais móveis equipados com emissores de placa oscilante são maiores do que os obtidos quando equipados com emissores de placa fixa, isso se dá, segundo os referidos autores, devido ao padrão de distribuição de água sobre a área irrigada, o qual é pouco distorcido para emissores de placa oscilante quando estes operam com elevadas velocidades de vento, apenas tendo seu padrão de distribuição deslocado na direção predominante do vento, justificando assim a diferença dos valores de uniformidade encontrados neste trabalho se comparado com os encontrados por Clark et al. (2003).

Tabela 1. Velocidade do vento, CUC, CUD e parâmetros das distribuições de probabilidade ajustadas para os 29 ensaios de campo.

Ensaio	V (m.s ⁻¹)	CUC (%)	CUD (%)	Normal		Uniforme		Weibull		Gama		Logística	
				μ	σ	a	b	λ	β	α	β	μ	K
E1	1,89	93,64	89,26	1,0000	0,0930	0,6342	1,3416	10,6507	0,6556	109,7886	0,0091	1,0000	0,0513
E2	5,34	90,81	86,04	1,0000	0,1146	0,7213	1,3183	8,9574	0,6372	77,5000	0,0129	1,0000	0,0632
E3	4,66	91,75	85,90	1,0000	0,1251	0,3057	1,2136	10,4098	0,6170	46,6019	0,0215	1,0000	0,0690
E4	5,18	89,97	82,82	1,0000	0,1536	0,1989	1,3812	7,9325	0,6431	28,1521	0,0355	1,0000	0,0847
E5	6,09	89,61	81,45	1,0000	0,1690	0,0657	1,3278	7,8025	0,6614	15,4382	0,0648	1,0000	0,0932
E6	5,86	90,93	83,49	1,0000	0,1602	0,1244	1,1815	10,0318	0,6296	18,8394	0,0531	1,0000	0,0883
E7	4,97	91,66	85,10	1,0000	0,1412	0,1544	1,3253	9,5208	0,6460	26,8302	0,0373	1,0000	0,0779
E8	5,46	90,83	84,54	1,0000	0,1917	0,1850	1,3610	6,0461	0,6498	20,1269	0,0497	1,0000	0,1057
E9	1,32	93,89	89,01	1,0000	0,0905	0,6232	1,2188	12,6502	0,6213	112,6165	0,0089	1,0000	0,0499
E10	1,00	93,18	88,51	1,0000	0,0991	0,4853	1,2311	12,2337	0,6185	86,6971	0,0115	1,0000	0,0546
E11	1,18	93,86	88,80	1,0000	0,0983	0,4585	1,3755	10,2462	0,6707	86,3490	0,0116	1,0000	0,0542
E12	1,55	92,80	88,27	1,0000	0,0989	0,6610	1,2971	10,7186	0,6335	98,7929	0,0101	1,0000	0,0545
E13	3,49	93,15	89,02	1,0000	0,0866	0,6918	1,1846	13,3561	0,6088	128,1140	0,0078	1,0000	0,0477
E14	0,76	93,60	89,14	1,0000	0,0929	0,5950	1,2815	11,3713	0,6425	107,0323	0,0093	1,0000	0,0512
E15	0,93	93,59	88,77	1,0000	0,0962	0,5152	1,2593	11,6233	0,6332	95,3460	0,0105	1,0000	0,0530
E16	1,25	93,63	89,01	1,0000	0,0860	0,6986	1,1865	14,3849	0,5972	126,9764	0,0079	1,0000	0,0474
E17	1,29	94,07	89,23	1,0000	0,0887	0,5609	1,1982	15,1620	0,5832	109,2969	0,0092	1,0000	0,0489
E18	3,37	89,00	80,52	1,0000	0,1415	0,5818	1,2468	8,9361	0,6058	45,0165	0,0222	1,0000	0,0780
E19	4,09	91,08	85,71	1,0000	0,1150	0,6372	1,2204	10,0253	0,6147	72,4105	0,0138	1,0000	0,0634
E20	1,02	93,34	88,30	1,0000	0,0963	0,5566	1,1828	13,0881	0,6030	95,9188	0,0104	1,0000	0,0531
E21	1,65	93,59	89,66	1,0000	0,0846	0,7125	1,1689	13,3912	0,6105	135,4118	0,0074	1,0000	0,0467
E22	0,71	93,40	87,68	1,0000	0,0992	0,5739	1,2250	13,3912	0,5918	87,5388	0,0114	1,0000	0,0547
E23	2,75	92,66	87,00	1,0000	0,0994	0,6493	1,1986	12,9763	0,5944	92,5661	0,0108	1,0000	0,0548
E24	3,71	88,21	81,17	1,0000	0,1459	0,6038	1,2967	8,0213	0,6200	44,4039	0,0225	1,0000	0,0804
E25	1,47	94,70	90,13	1,0000	0,0956	0,3906	1,2110	14,2554	0,6166	80,1871	0,0125	1,0000	0,0527
E26	1,99	93,10	87,84	1,0000	0,1099	0,3527	1,2346	11,6850	0,6214	61,2356	0,0163	1,0000	0,0606
E27	2,08	93,14	88,44	1,0000	0,1047	0,4394	1,2505	11,6460	0,6246	74,5135	0,0134	1,0000	0,0577
E28	1,31	93,56	88,55	1,0000	0,0923	0,6531	1,1858	14,3632	0,5936	105,0808	0,0095	1,0000	0,0509
E29	2,45	91,32	85,66	1,0000	0,1144	0,7132	1,2801	9,4211	0,6274	75,7872	0,0132	1,0000	0,0630

Os valores do parâmetro desvio padrão (σ) da distribuição normal de probabilidades, Tabela 1, variaram entre 0,0846 e 0,1690. E, quando analisados em função da velocidade do vento, verifica-se a tendência de aumento dos valores deste parâmetro para velocidades elevadas, indicando assim que essa variável meteorológica afeta negativamente a uniformidade de distribuição de água do equipamento.

Dividindo-se o desvio padrão pela lâmina média de cada ensaio, obteve-se o coeficiente de variação (CV), e, como a média das lâminas adimensionalizadas é 1,

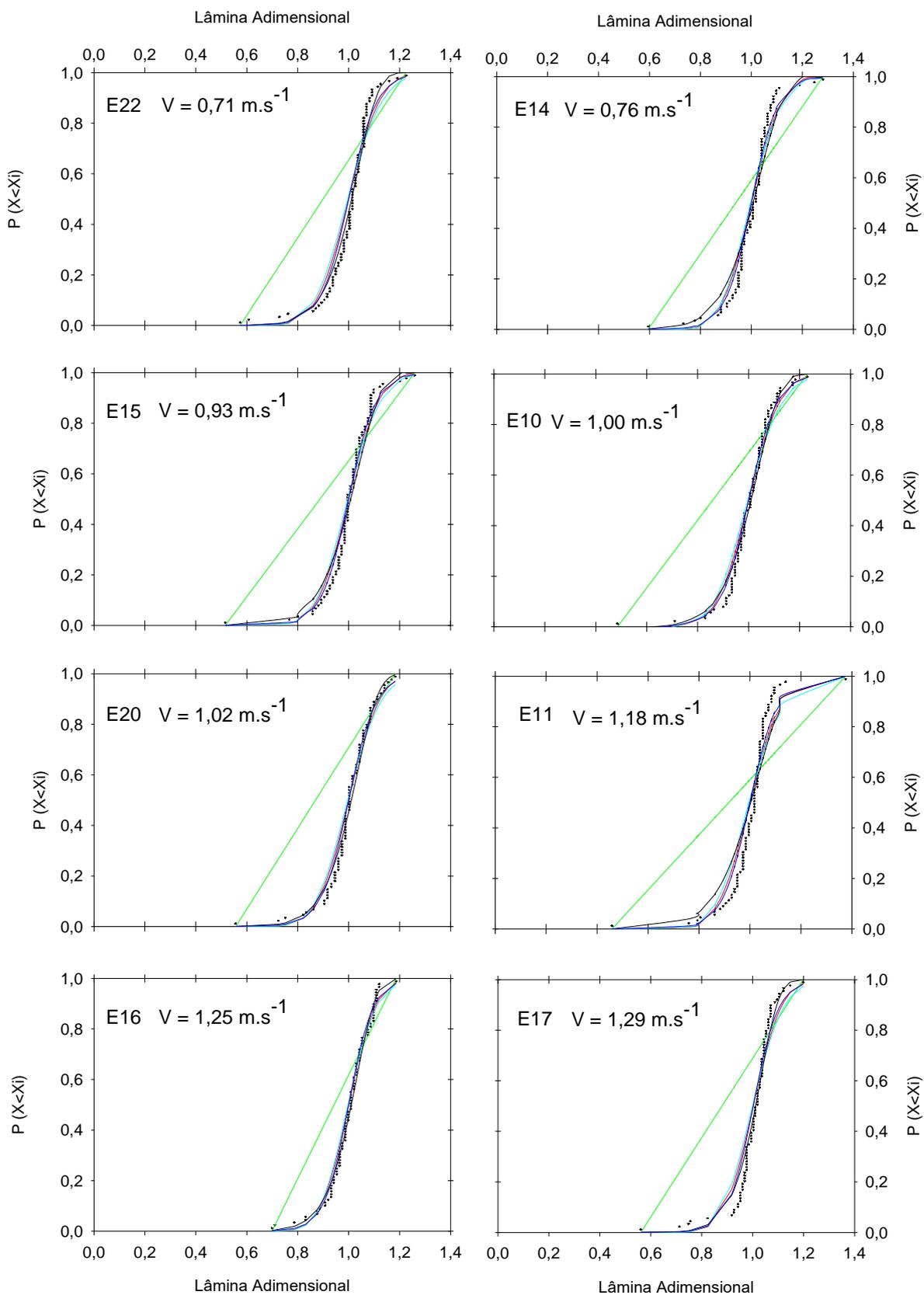
o desvio padrão foi igual ao CV. Resultado semelhante ao obtido neste estudo, foi observado por Heermann et al. (1992), que observaram o aumento do CV com o incremento da velocidade do vento para ensaios utilizando um pivô central.

Heermann et al. (1992), comparando emissores de impacto com emissores do tipo spray de placa fixa, operando em um equipamento de irrigação por aspersão do tipo pivô central, afirmaram, por meio do coeficiente de variação, que os aspersores tipo spray aplicam água de maneira mais uniforme que os aspersores de impacto, atribuindo isso aos seus CV que foram de 0,18 e 0,25, respectivamente.

Comparando os resultados dos CV obtidos por Heermann et al. (1992) com os obtidos neste estudo, pode-se afirmar que os emissores de placa oscilante modelo I-Wob (CV = 0,10) aplicam água de maneira mais uniforme do que os emissores do tipo Spray de Placa Fixa (CV = 0,18) e emissores de impacto (CV = 0,25).

Dukes (2006), utilizando emissores do tipo Spray de Placa Oscilante (I-Wob) obteve como resultado para o coeficiente de variação o valor de 0,13, sendo esse próximo ao obtido no presente estudo, porém quando avaliando emissores de placa fixa modelo LDN obteve valor de CV igual a 0,26, sendo este valor superior ao obtido com emissores I-Wob, indicando assim a melhor uniformidade de distribuição de água desses aspersores operando em condições de vento.

Utilizando-se os parâmetros das distribuições apresentados na Tabela 1, foram plotadas as funções cumulativas de probabilidade (FCP), das distribuições normal, uniforme, gama, Weibull e logística, além da distribuição empírica para os dados observados em campo, para ensaios realizados no equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel sob velocidades médias do vento inferiores à $2,00 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 8).



...Continua...

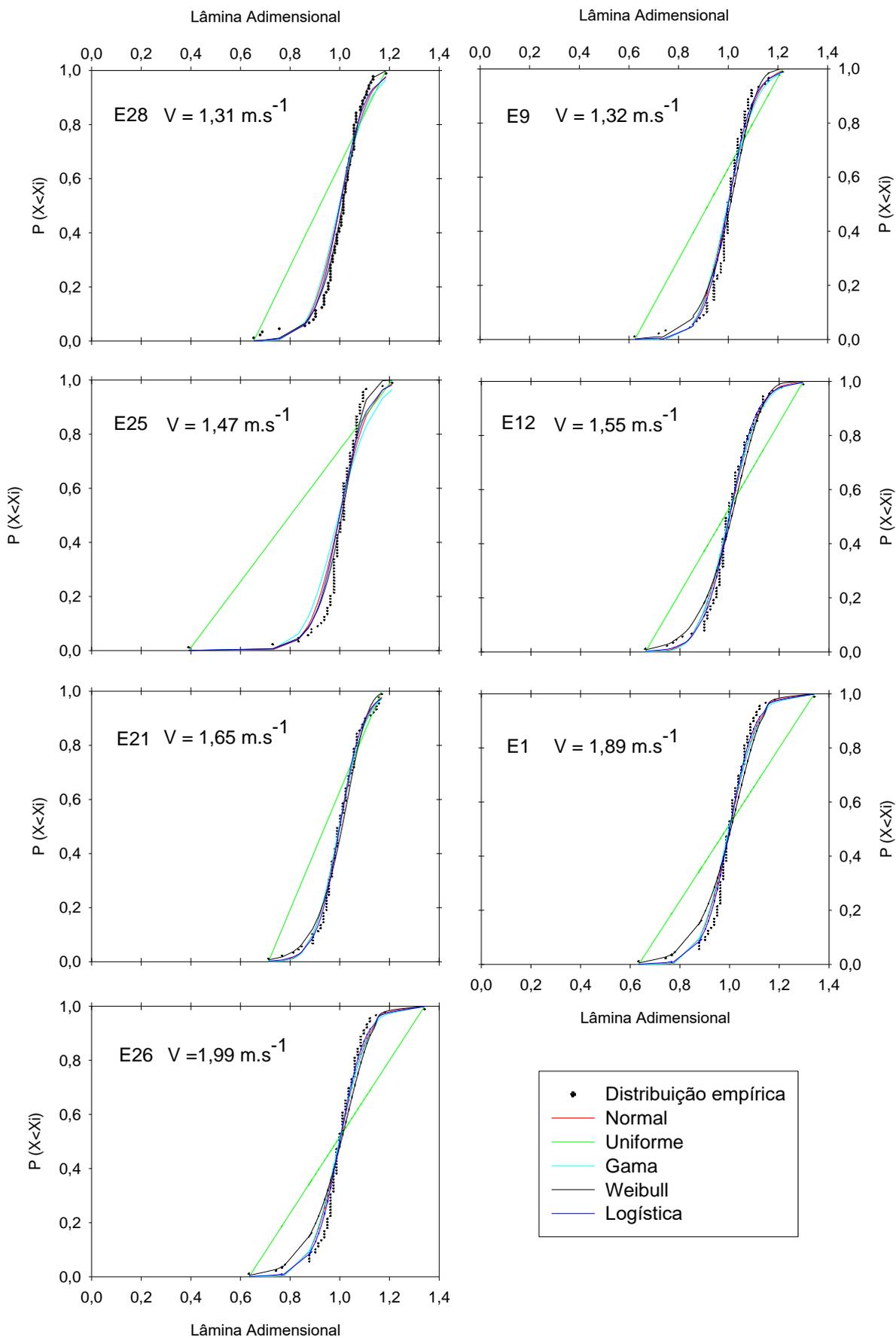


Figura 8. Funções cumulativas de probabilidades (FCP) das distribuições testadas e dos dados observados em campo para os ensaios realizados sob velocidade de vento inferior a $2,00 \text{ m.s}^{-1}$.

Para os 15 ensaios apresentados na Figura 8, realizados com velocidades médias de vento inferiores à $2,00 \text{ m.s}^{-1}$, e, todos eles com elevados valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (próximos à 93%), pode-se verificar uma elevada inclinação das curvas das FCP assim como da distribuição empírica, fato este atribuído à pequena variação na amplitude das lâminas coletadas nos ensaios de campo (Figura 3), o qual também foi observado por Heermann et al. (1992) testando pivôs centrais equipados com emissores de spray de placa fixa ou de impacto nos Estados Unidos da América.

Também pode-se verificar na Figura 8 o comportamento muito similar das distribuições normal, Weibull, gama e logística, além disto, todas estas distribuições se mantiveram muito próximas às distribuições das lâminas observadas em campo. Entretanto, a distribuição Uniforme teve um comportamento diferente do restante das distribuições, fato este que diverge dos obtidos por Karmeli (1978), que relatou que a distribuição uniforme representa adequadamente os dados observados em campo, resultado esse pode ser justificado pelas diferentes metodologias de estimação dos parâmetros da distribuição adotada neste estudo.

Na Figura 9, estão contidas as FCP das distribuições teóricas de probabilidades utilizadas neste estudo e a distribuição empírica de probabilidade para os 6 ensaios de campo realizados sob velocidades médias de vento entre $2,00$ e $4,00 \text{ m.s}^{-1}$.

Na Figura 9, pode-se observar uma maior inclinação das curvas das funções cumulativas de probabilidade assim como da distribuição dos dados observados, se comparados com a Figura 8, fato esse pode ser atribuído à redução da uniformidade de aplicação de água que o incremento na velocidade média do vento durante os ensaios acarretou. Entretanto, corroborando com resultados obtidos por Heermann et al. (1992), mesmo com o incremento na velocidade do vento, as distribuições teóricas de probabilidades se aproximam dos dados observados em campo.

Também pode-se observar que a distribuição uniforme de probabilidades teve um comportamento pouco representativo da distribuição das lâminas observadas em campo, sendo que este fato pode ser explicado devido ao fato de existirem valores extremos, principalmente de valores mínimos, observados nas extremidades do equipamento, conforme pode ser observado nas Figuras 3, 4 e 5.

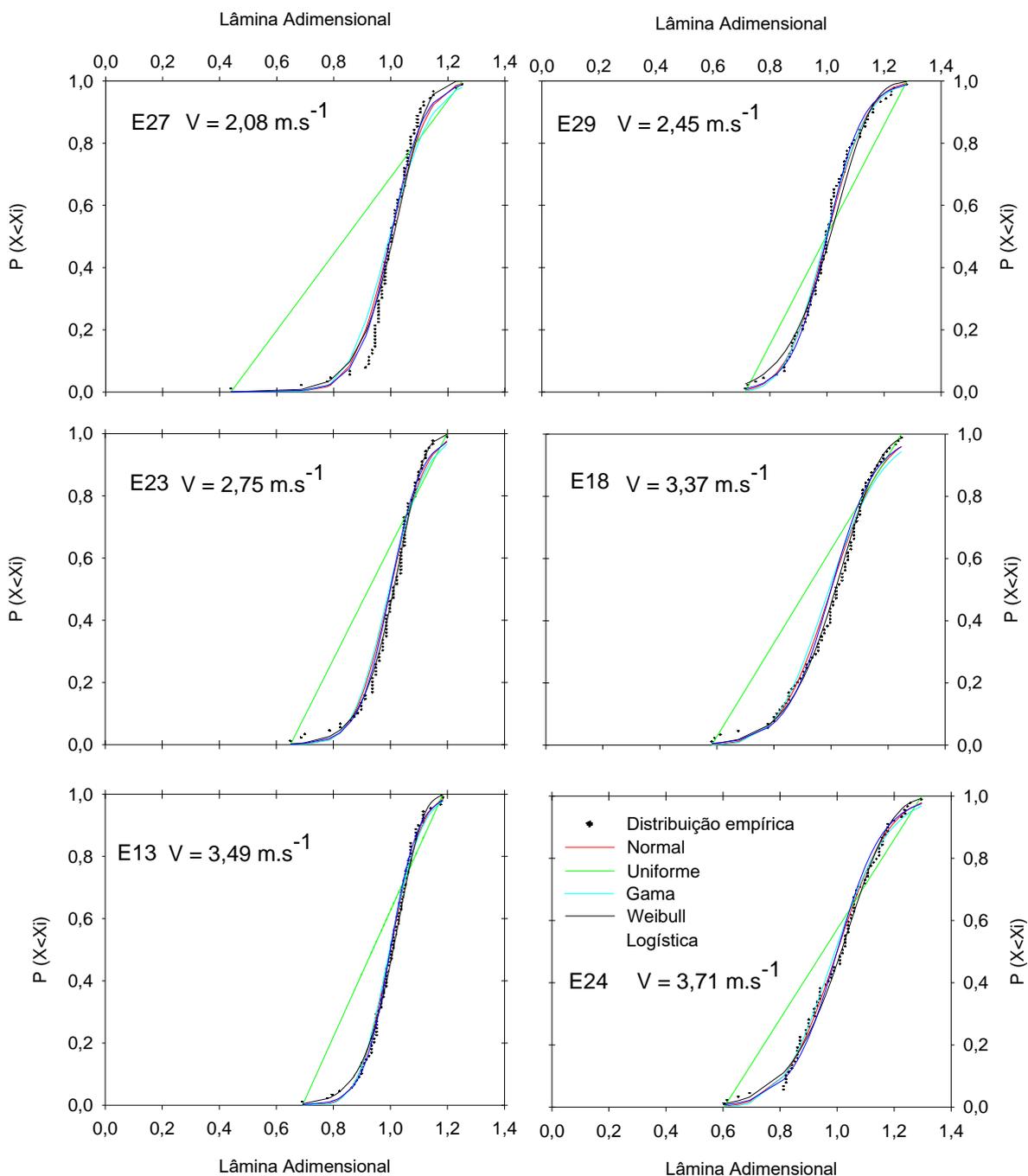


Figura 9. Funções cumulativas de probabilidades (FCP) das distribuições testadas e dos dados observados em campo para os ensaios realizados sob velocidade de vento entre 2,00 e 4,00 m.s^{-1} .

As funções cumulativas de probabilidades das distribuições normal, uniforme, Weibull, gama e logística utilizadas além da distribuição empírica das lâminas observadas nos 8 ensaios de campo realizados sob velocidades médias de vento superiores à 4,00 m.s^{-1} são mostradas na Figura 10.

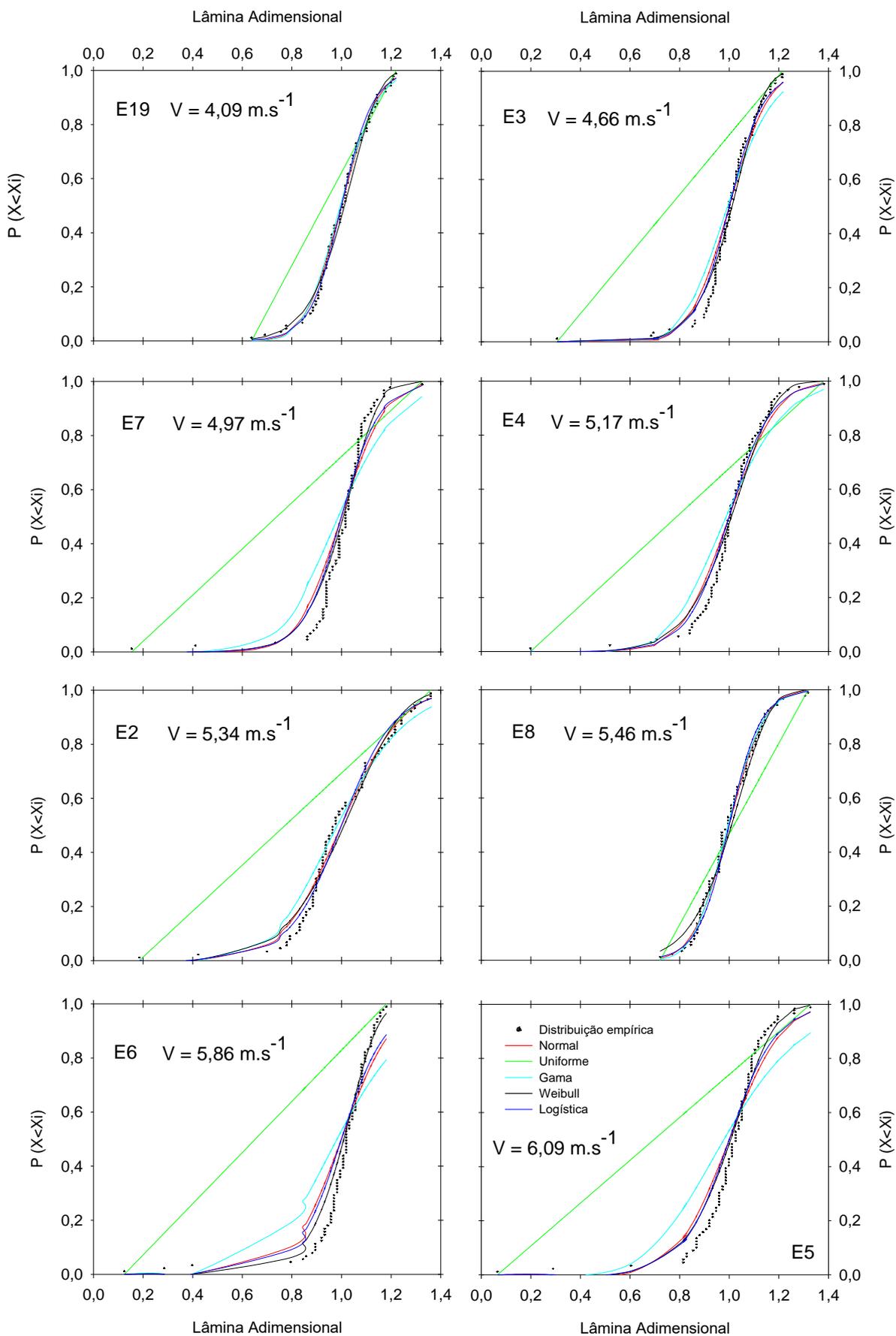


Figura 10. Funções cumulativas de probabilidades (FCP) das distribuições testadas e dos dados observados em campo para os ensaios realizados sob velocidade de vento superiores à $4,00 \text{ m.s}^{-1}$.

As funções cumulativas de probabilidades, assim como a distribuição empírica das lâminas adimensionais de água dos ensaios de campo realizados sob as maiores velocidades de vento ($V > 4,00 \text{ m.s}^{-1}$), mostrados na Figura 10, sendo possível verificar nesta figura a maior inclinação das curvas das funções, reforçando a influência negativa da velocidade do vento na uniformidade de distribuição de água.

O melhor desempenho em representar os dados observados em campo das distribuições Weibull, logística e normal, corroborando com resultados obtidos por Dukes (2006), o qual verificou para situações semelhantes, também utilizando um equipamento mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel, que essas distribuições foram as que melhores representaram a distribuição das lâminas de água aplicadas pelo equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel.

4.4 Adequabilidade das distribuições teóricas de probabilidades

Na Tabela 2 são apresentados os valores obtidos no teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), aplicado para verificar a aderência das distribuições de probabilidades teóricas ajustadas neste estudo com a distribuição empírica das lâminas observadas nos ensaios de campo.

Seguindo a metodologia sugerida por Naghettini e Pinto (2007), através da Equação 20, determinou-se que a maior diferença absoluta entra a função cumulativa de probabilidade (FCP) das distribuições teóricas testadas neste estudo para a distribuição empírica observada nos ensaios de campo, foi igual a 0,1448.

Sendo assim, na Tabela 2, pode-se observar que a distribuição normal de probabilidades, a qual é amplamente utilizada e indicada na literatura para representar a distribuição da água aplicada em diversos sistemas de irrigação, ajustou-se adequadamente à maioria dos ensaios realizados, corroborando com resultados encontrados por Heermann et al. (1992) e Dukes (2006), que também observaram o adequado ajuste da distribuição normal para representar a distribuição das lâminas aplicadas por equipamentos de irrigação do tipo pivô central e lateral móvel, respectivamente.

Tabela 2. Índices de Kolmogorov-Smirnov (KS) para avaliar o ajuste das distribuições testadas para os 29 ensaios de campo

Ensaio	Normal	Uniforme	Gama	Weibull	Logística
E1	0,1229	0,2894*	0,1367	0,1401	0,1047
E2	0,0751	0,2018*	0,0623	0,0875	0,0883
E3	0,1238	0,5632*	0,1649*	0,0937	0,1026
E4	0,1178	0,4746*	0,1695*	0,0975	0,0988
E5	0,1473*	0,5488*	0,2267*	0,1226	0,1350
E6	0,2046*	0,6395*	0,2668*	0,1438	0,1913*
E7	0,1777*	0,5595*	0,2486*	0,1445	0,1564*
E8	0,0787	0,4494*	0,1225	0,0952	0,0805
E9	0,1348	0,3888*	0,1496*	0,1078	0,1251
E10	0,1216	0,4815*	0,1457*	0,1036	0,0990
E11	0,1556*	0,3886*	0,1778*	0,1613*	0,1417
E12	0,0970	0,2939*	0,1100	0,1098	0,0786
E13	0,0617	0,3227*	0,0725	0,0560	0,0630
E14	0,1255	0,3601*	0,1410	0,1318	0,1039
E15	0,1202	0,4178*	0,1402	0,1062	0,1018
E16	0,0824	0,3424*	0,0963	0,0668	0,0718
E17	0,1612*	0,4989*	0,1839*	0,1173	0,1392
E18	0,0994	0,2602*	0,1196	0,0534	0,0984
E19	0,0525	0,3136*	0,0616	0,0695	0,0572
E20	0,1148	0,4657*	0,1342	0,0895	0,0993
E21	0,0756	0,3417*	0,0826	0,0776	0,0553
E22	0,1366	0,4131*	0,1554*	0,1056	0,1375
E23	0,0972	0,3542*	0,1131	0,0622	0,1094
E24	0,0658	0,2438*	0,0848	0,0668	0,0738
E25	0,1899*	0,5543*	0,2176*	0,1425	0,1774*
E26	0,1299	0,5438*	0,1642*	0,0979	0,1124
E27	0,1581*	0,5073*	0,1865*	0,1340	0,1369
E28	0,1174	0,3974*	0,1360	0,0721	0,0994
E29	0,0682	0,1745*	0,0623	0,1077	0,0589

*Ensaio que não passaram no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov à um nível de significância de 5% ($KS \leq 0,1448$).

Nenhum ensaio de campo (Tabela 2) do equipamento mecanizado lateral móvel de irrigação se ajustou à distribuição uniforme de probabilidades (5% de significância), diferente do observado por Karmeli (1978), o qual indicou que, para equipamentos de irrigação por aspersão convencional, a distribuição uniforme representou adequadamente o perfil de distribuição da água aplicada, e, com adequabilidades semelhantes às obtidas com a distribuição normal, divergência essa podendo ser justificada às diferentes metodologias adotadas para a estimação dos parâmetros da distribuição uniforme de probabilidades.

Elliott et al. (1980), avaliando sistemas de irrigação convencionais, afirmaram que quanto menor a uniformidade de distribuição de água aplicada pelo equipamento, pior é o ajuste das lâminas observadas às das distribuições teóricas, entretanto, os autores afirmam que a distribuição normal e uniforme representaram adequadamente as distribuições de água aplicada por sistemas convencionais de irrigação.

Karmeli (1978) concluiu que a distribuição uniforme de probabilidades representa de forma mais fiel do que a distribuição normal, perfis de distribuição de água quando o sistema operar com uniformidades baixas ($CUC < 55\%$), e, como o equipamento utilizado no presente estudo apresentou elevados índices de uniformidade de aplicação de água (Tabela 1), assume-se que esta distribuição de probabilidade, utilizando estimadores de máxima verossimilhança, não representa adequadamente o perfil de distribuição de água aplicada em sistemas mecanizados tipo lateral móvel de irrigação, quando estes estiverem equipados com emissores de placa oscilante modelo I-Wob.

Já a distribuição teórica de probabilidades de Weibull se ajustou adequadamente (5% de significância) a distribuição dos dados medidos em campo em 28 dos 29 ensaios de campo realizados no equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel (Tabela 2). Esse fato pode ser explicado devido ao fato de as lâminas mais distantes da média serem inferiores à média, assim a distribuição de Weibull que é uma distribuição assimétrica e possui uma cauda mais alongada para os valores extremos de mínimo, descreve melhor os dados obtidos neste estudo, corroborando assim com o observado por Chaudhry (1976), que também verificou uma assimetria da distribuição das lâminas aplicadas por um equipamento de irrigação por aspersão convencional.

Desta forma, Chaudhry (1976) afirma que problemas de ajuste de distribuições teóricas de probabilidades à distribuição das lâminas aplicada pelo equipamento de irrigação pode se dar devido a assimetria do padrão de distribuição de água.

Entretanto, testando o ajuste da distribuição gama, Chaudhry (1976) afirmou que esta distribuição tende a representar a distribuição de água aplicada por um sistema de irrigação melhor que a distribuição normal, resultado este diferente do obtido no presente estudo, onde foi constatado a inadequada utilização da distribuição gama para grande parte dos ensaios de campo.

Já a distribuição logística de probabilidades se ajustou adequadamente (5% de significância) a 26 ensaios de campo do equipamento mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel (Tabela 2). Este resultado está em concordância com o obtido por Dukes (2006), o qual testando aspersores I-Wob equipados em um lateral móvel, no Estado da Califórnia – EUA, observou que a distribuição logística de probabilidades representou adequadamente os perfis de distribuição de água.

Também é possível observar a melhor representatividade dos dados observados em campo pela distribuição logística de probabilidades, quando comparada com a distribuição normal, já que os índices KS indicaram que um maior número de ensaios foi representado adequadamente (5% de significância) pela distribuição logística.

4.5 Validação do modelo proposto

Com as lâminas adimensionalizadas, o desvio padrão de cada ensaio de campo foi igualado ao coeficiente de variação, sendo assim foi possível generalizar os resultados obtidos para qualquer valor de lâmina de água aplicada. Retirando-se a influência da altura da lâmina aplicada, o desvio padrão (σ) e a escala (k) de cada ensaio de campo foram relacionados com a velocidade média do vento durante os ensaios de campo, tendo os resultados obtidos destas relações apresentados nas Figuras 11A e 11B, respectivamente.

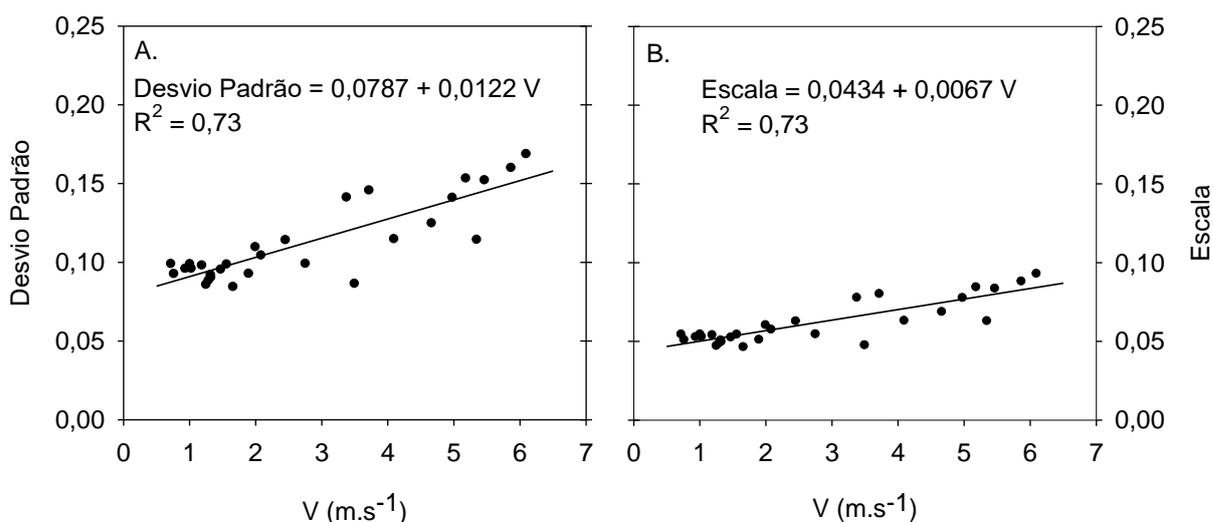


Figura 11. Relação entre o parâmetro desvio padrão da distribuição normal de probabilidades (A) e escala da distribuição logística de probabilidades (B) com a velocidade média do vento em cada ensaio realizado no equipamento mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel.

A influência da velocidade do vento no desvio padrão dos ensaios de campo com as lâminas adimensionalizadas, foi descrita através de uma equação polinomial de primeira ordem, como está mostrado na Figura 11A, sendo a metodologia de adimensionalização das lâminas de água aplicada sugerida por Karmeli (1978).

Com as lâminas adimensionalizadas observou-se, com um elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,73$), a influência da velocidade do vento no desvio padrão, resultado esse também obtido por Faci et al. (2001), Dechmi et al. (2003), Clark et al. (2003) e Faria et al. (2009) testando diversos equipamentos e aspersores indicaram que a velocidade do vento influencia na uniformidade de aplicação de água de um equipamento de irrigação por aspersão.

É possível identificar, Figura 11B, um incremento nos valores do parâmetro de escala com o aumento na velocidade do vento ($R^2 = 0,73$) em que os ensaios de campo foram realizados. Observa-se também, uma relação linear entre o parâmetro de escala e a velocidade do vento, comportamento esse semelhante ao observado no desvio padrão. Sendo de amplo conhecimento que a velocidade do vento é o fator que exerce maior influência sobre a uniformidade de aplicação de água aplicada por equipamentos de irrigação por aspersão (FACI et al., 2001; DECHMI et al., 2003; CLARK et al., 2003 e FARIA et al., 2009), pode-se assim, indicar a relação destes parâmetros (desvio padrão e escala) com a uniformidade com que o equipamento de irrigação aplica água.

Na Figura 12 estão mostrados os parâmetros de forma (Figura 12A) e de localização (Figura 12B) da distribuição Weibull de probabilidades em função da velocidade média do vento nos 29 ensaios de campo do equipamento mecanizado de irrigação tipo lateral móvel.

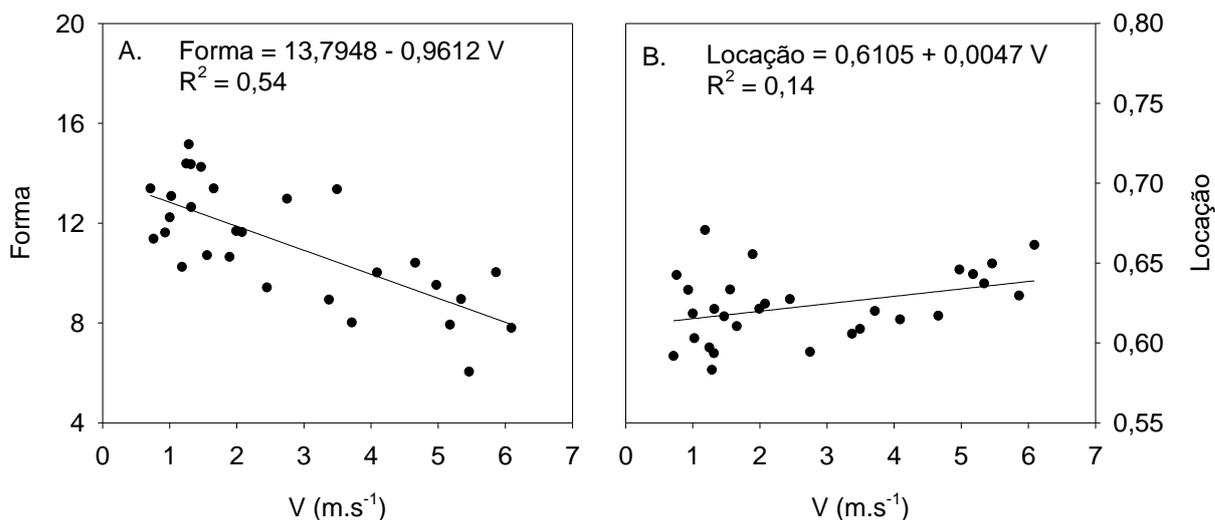


Figura 12. Relação entre a velocidade média do vento e os parâmetros de forma (A) e localização (B) da distribuição Weibull de probabilidades.

Não é possível verificar uma relação entre a velocidade do vento e os parâmetros da distribuição Weibull, Figura 12, principalmente para o parâmetro de localização (Figura 12 B), o qual apresentou uma ampla dispersão dos dados para velocidades de vento iguais, sendo esse resultado reforçado pelo baixo valor obtido no coeficiente de desempenho ($R^2 = 0,14$), fato esse que compromete o uso do modelo da distribuição Weibull para a modelagem dos parâmetros em função da velocidade do vento.

Desta forma, foram utilizados, para gerar o modelo, os parâmetros da distribuição normal e logística de probabilidade, que, a variação dos parâmetros de escala das respectivas funções, foram adequadamente representados pela variação da velocidade do vento em que o ensaio foi realizado.

Sendo assim, na Figura 13 são apresentadas as comparações, seguindo recomendações de Dukes (2006), entre os valores do Coeficiente de Uniformidade Christiansen (CUC) e do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) observados nos 29 ensaios de campo do equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel e os valores destes coeficientes (CUC e CUD) simulados por meio dos

modelos propostos na Figura 11, ajustando-se as distribuições normal e logística de probabilidades.

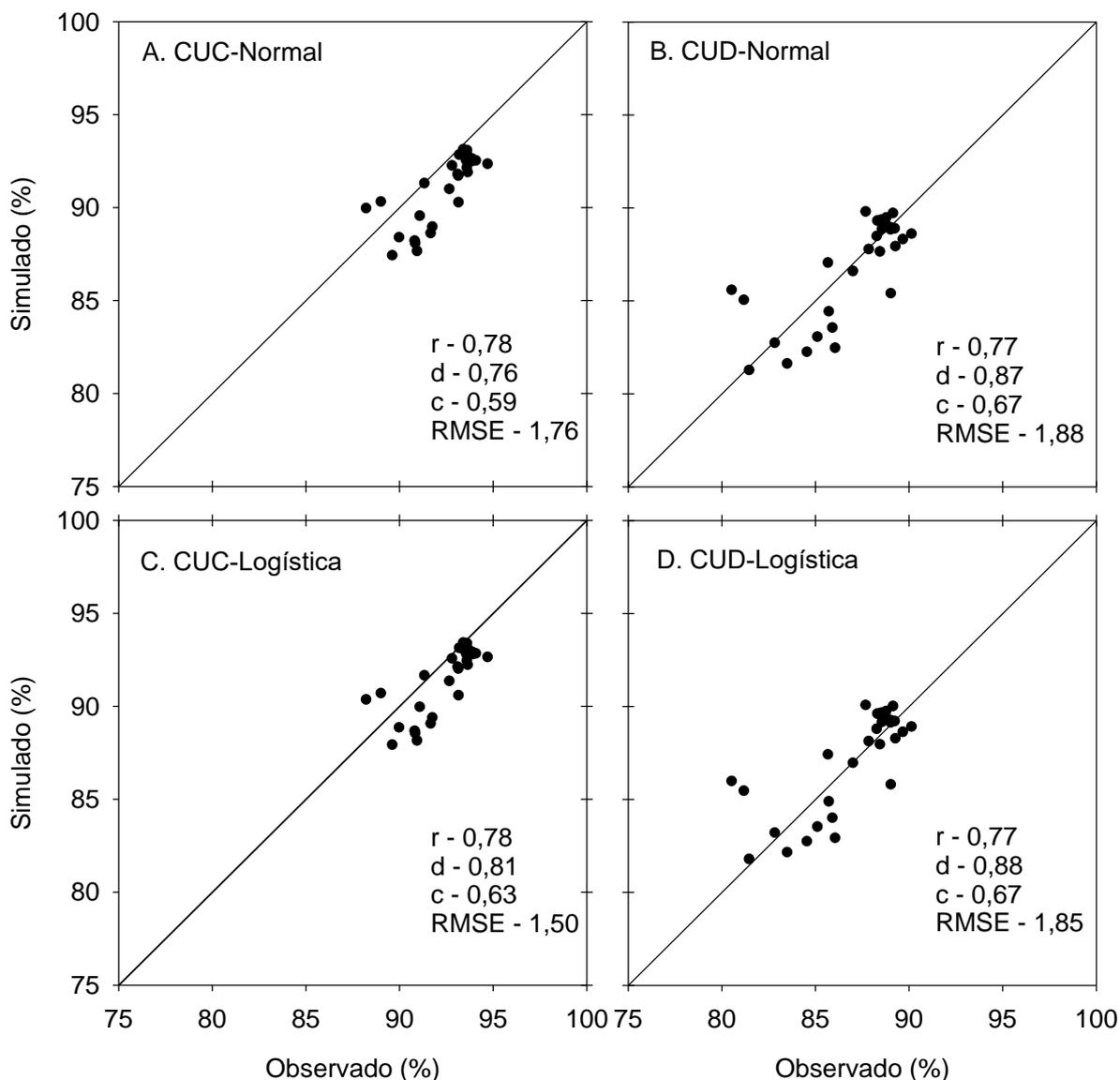


Figura 13. Relação entre os valores observados nos ensaios de campo do CUC (A e C) e da CUD (B e D), com os valores obtidos com a análise de Monte Carlo para a Distribuição Normal de Probabilidades (A e B) e para a Distribuição Logística de Probabilidades (C e D).

Os pares de valores (simulado vs. observado) de CUC (Figura 13A) e CUD (Figura 13B) obtidos com a distribuição normal de probabilidades estão concentrados ao redor da reta 1:1, porém mais distantes dessa reta quando comparados os pares de valores de CUC (Figura 13C) e CUD (Figura 13D) obtidos por meio de simulações com a distribuição logística, o que é confirmado pelos altos valores obtidos por meio dos índices de adequabilidade utilizados neste estudo:

coeficiente de correlação (r), pelo índice de Willmott (d), índice de confiança e desempenho (c) e raiz do erro quadrático médio (RMSE).

O índice de confiança e desempenho (c), proposto por Camargo & Sentelhas (1997), apresentou, por meio da distribuição normal de probabilidades, para o modelo proposto para estimar o CUC ($c = 0,59$), Figura 13A, valor de adequabilidade classificado como sofrível ($0,51 \leq c \leq 0,60$) e bons para o CUD ($c = 0,67$), Figura 13B. Para os modelos propostos para estimar CUC e CUD, através da distribuição logística de probabilidades, Figuras 13C e D respectivamente, obteve-se valores para o índice de confiança e desempenho (c) foram de 0,63 e 0,67 para CUC e CUD, respectivamente, sendo estes também classificados como mediano para o caso do CUC e como bom para o CUD.

Através do índice de confiança e desempenho, foi possível verificar a melhor representatividade dos dados simulados pela distribuição logística de probabilidades, estando em concordância com os valores obtidos no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS), Tabela 2.

Analisando a variabilidade entre os valores simulados e observados nos ensaios de campo, com o equipamento de irrigação mecanizada do tipo lateral móvel, calculada por meio da raiz do erro quadrático médio (RMSE), observou-se um melhor desempenho da distribuição logística em comparação com a distribuição normal, para representar a distribuição dos valores de CUC, já que o valor do RMSE foi igual a 1,50% (Figura 13C) frente aos 1,76% (Figura 13A) obtidos através da distribuição normal, diferença essa já mostrada pelo índice de confiança e desempenho.

Na análise dos Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD) estimados, conforme indicado pelos valores obtidos do índice RMSE, pode-se verificar um comportamento muito próximo entre as distribuições de probabilidade normal e logística, como indicam os valores obtidos, de 1,88% (Figura 13B) para o CUD estimado pela distribuição normal e 1,85% (Figura 13D) para o simulado pela logística.

5 Conclusões

Os valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen variaram entre 88,21% e 94,7% e os do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição entre 80,52% e 90,13% indicando que o equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel operou, mesmo quando em condições de elevadas velocidades de vento, com alta uniformidade de aplicação de água.

A distribuição normal de probabilidade representou adequadamente 22 dos 29 ensaios de campo realizados no equipamento de irrigação mecanizado tipo lateral móvel, indicando assim, o bom desempenho desta distribuição para representar a lâmina de água aplicada por este tipo de equipamento, assim como as distribuições Weibull e logística que representaram adequadamente a 28 e 26, respectivamente, perfis das lâminas de água aplicadas nos 29 ensaios de campo do equipamento de irrigação, indicando a maior utilização destas distribuições.

A distribuição gama falhou em 13 dos 29 ensaios de campo, e a distribuição uniforme falhou no ajuste a todos os ensaios de campo realizados no equipamento mecanizado de irrigação tipo lateral móvel.

Os parâmetros de escala das distribuições normal e logística explicaram adequadamente a variação em função da velocidade média do vento, resultado esse não obtido para a distribuição Weibull.

Os modelos propostos por meio dos parâmetros de Escala das distribuições normal e logística representaram de forma adequada a boa, o desempenho do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel operando em diversas condições de vento.

Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos do Brasil**: 2013. Brasília. 432p, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. **Standard 436.1**: Test procedure for determining the uniformity of water distribution of center pivot and lateral move irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles. St. Joseph, Michigan. 1996.

ANYOJI, H.; WU, I. P. Normal distribution water application for drip irrigation schedules. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**. v. 37, n.1, p.159-164, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14244**: Equipamentos de irrigação mecanizada – Pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos – determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, 11 p., 1998.

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

BURT, C. M.; CLEMMENS, A. J.; STRELKOFF, T. S.; SOLOMON, K. H.; BLIESNER, R. D.; HARDY, L. A.; HOWELL, T. A.; EISENHAUER, D. E. Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v.123, n.6, p.423-442, 1997.

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CHAUDHRY, F. H. Sprinkler uniformity measures and skewness. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. v.106, n.4, p.425-433, 1976.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942. 124p. (Bulletin, 670).

CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, ano XXII, n. 1, jan./fev./mar., 2013.

CHRISTOFIDIS, D. O futuro da irrigação e a gestão das águas. **Série Irrigação e Água**. Departamento de Desenvolvimento Hidroagrícola, Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica, Ministério da Integração Nacional, Brasília, novembro, 2008.

CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. **Revista ITEM**. São Paulo, n.49, p. 8-13, 2001.

CLARK, G. A.; SRINIVAS, K.; ROGERS, D. H.; STRATTON, R.; MARTIN, V. L. Measured and simulated uniformity of low drift nozzle sprinklers. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**. Vol. 46, n.2, p.321–330. 2003

CRIDDLE, W. D.; DAVIS, S.; PAIR, C. H.; SHUCKELY, D. G. **Methods for evaluation irrigation systems**. Washington: USDA, 1956. 24 p. (Agricultural Handbook, 82).

CRYSTAL BALL. **Crystal Ball User Guide**: 11.1.2.3. Denver, Colorado. 2013. Disponível em: <http://docs.oracle.com/cd/E40248_01/epm.1112/cb_user.pdf>. Acesso em: 14 Mai. 2015.

CRUSCIOL, C. A. C.; TOLEDO, M. Z.; ARF, O.; CAVARIANI, C. Fornecimento de água por meio de irrigação por aspersão para produção de sementes de arroz de terras altas. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, p. 34-42, 2012.

CRUSCIOL, C. A. C.; MACHADO, J. R.; ARF, O.; RODRIGUES, R. A. F. Produtividade do arroz irrigado por aspersão em função do espaçamento e da densidade de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.35, n.6, p.1093-1100, 2000.

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; CAVERO, J.; FACI, J. M; MARTÍNEZ-COB, A. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays*). **Irrigation Science**. v. 22, n.2, p. 67-77, 2003.

DUKES, M. D. Effect of wind speed and pressure on linear move irrigation system. **Applied engineering in agriculture**. v.22, n.4, p.541-548, 2006.

ELLIOTT, R. L.; NELSON, J. D.; LOFTIS, J. C.; HART, W. E. Comparison of sprinkler uniformity models. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. v.106, n.4, p.321-330, 1980.

FACI, J. M.; SALVADOR, R.; PLAYÁN, E.; SOURELL, H. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v.127, n.4, p.224-233, 2001.

FARIA, L. C.; COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H. F. E.; DO PRADO, G. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. **Engenharia Agrícola**. v.29, n.1, p.19-27, 2009.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. AquaStat Database.

Disponível em:

<<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>>. Acesso em: 06 abr. 2015.

HART, W. E.; REYNOLDS, W. N. Analytical Design of sprinkler systems. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**. v.8, n.1, p.83-85, 1965.

HEERMANN, D. F.; DUKE, H. R.; SERAFIM, A. M.; DAWSON, L. J. Distribution functions to represent center-pivot water distribution. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**. v.32, n.5, p.1465-1472, 1992.

HEINEMANN, A. B.; FRIZZONE, J. A.; PINTO, J. M.; FILHO, J. C. F. Influência da altura do emissor na uniformidade de distribuição da água de um sistema pivô central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 9, p. 1487-1491, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEORGRAFIA E ESTATÍSTIA – IBGE. **Produção agrícola municipal**: Culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, v.40, 102 p., 2013.

KARMELI, D. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**. v.21, n.4, p.682-686, 1978.

KATO, Y.; KATSURA, K. Rice adaptation to aerobic soils: Physiological considerations and implications for agronomy. **Plant Production Science**. v.17, n.1, p.1-12, 2014.

KINCAID, D. C. Application uniformity of low pressure center pivot equipment. In: **Proc. Winter commodity Schools**. USA-ID-Burley. p.91-93, 1996.

LIMA, G. A. C.; VIDAL, A. C.; SUSLICK, S. B. Análise de impactos da metodologia de estimativa da porosidade em reservas de petróleo por meio de simulação de Monte Carlo. **Revista Escola de Minas**. v.59, n.2, p.239-246, 2006.

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

MELLO, C. R.; SILVA A. M. **Hidrologia**: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. Lavras: UFLA. 455 p., 2013.

MOLDEN, D.; OWEIS, T. Y.; STEDUTO, P.; KIJNE, J. W.; HANJRA M. A., BINDRABAN, P. S. Pathways for increasing agricultural water productivity. In: MOLDEN, D. (editor) **Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture**. 2007, p. 279-310. Earthscan, Londres.

MUSICK, J. T.; PRINGLE, F.B.; WALKER, J. D. Sprinkler and furrow irrigation trends – Texas High Plains. **Applied Engineering in Agriculture**. v.4, n.1, p.46-52, 1988.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM. 552 p., 2007.

NOGUÉS, J.; HERRERO, J. The impact of transition from flood to sprinkler irrigation on water district consumption. **Journal of Hydrology**, v. 276 p. 37-52, 2003.

OPEÑA, J. L.; QUILTY, J. R.; CORREA JR, T. Q.; CHAUHAN, B. S. Weed population dynamics, herbicide efficacies, and crop performance in a sprinkler-irrigated maize-rice cropping system. **Field Crops Research**. v.167, p.119-130, 2014.

PARFITT, J. M. B.; PINTO, M. A. B.; TIMM, L. C.; BAMBERG, A. L.; SILVA, D. M. da; BRETANHA, G. Manejo da irrigação por aspersão e desempenho da cultura do arroz. In: VII Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 2011. **Anais...** Balneário Comburui: EPAGRI/SOSBAI, 2011. p. 461-464.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M. V.; ZOLIN, C. A. L.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; JOSÉ, J. V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**. v.16, n. 2, p.163-176, 2011.

SANCHEZ, I.; ZAPATA, N.; FACI, J. M.; MARTÍNEZ-COB, A. The spatial variability of the wind in a sprinkler irrigated district: Implications for irrigation management. **Biosystems Engineering**. v. 109, n.1, p. 65-76. 2011.

SANDRI, D.; CORTEZ, D. A. Parâmetros de desempenho de dezesseis equipamentos de irrigação por pivô central. **Ciência e Agrotecnologia**. v.33, n.1, p.271-278, 2009.

SPANU, A.; MURTAS, A.; BALLONE, F. Water use and crop coefficients in sprinkler irrigated rice. **Italian Journal of Agronomy**. v.4, n.2, p.47-58, 2009.

STAMBOULI, T.; ZAPATA, N.; FACI, J. M. Performance of new agricultural impact sprinkler fitted with plastic nozzles. **Biosystems Engineering**. v.118, p.39-51, 2014.

STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA-GEORGIU, E. Frequency analysis of extreme events. In: MAIDMENT, D. R. (Ed.). **Handbook of Hydrology**, New York, McGraw-Hill, 1993, p.18.1-18.66.

STEINMETZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr, A. M. (Eds.) **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 45-74.

TARJUELO, J. M.; GÓMEZ, M. V.; PARDO, J. L. Working conditions of sprinkler to optimize application water. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 118, p. 895-913, 1992.

TARJUELO, J. M.; MONTERO, J.; CARRIÓN, P. A.; HONRUBIA, F. T.; CALVO, M. A. Irrigation uniformity with medium size sprinklers part II: Influence of wind and other factors on water distribution. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**. v. 42, n. 3, p. 677-689, 1999.

THOM, H. C. S. A note on the gamma distribution. **Monthly weather review**. v.86, n.4, p.117-122, 1958.

TOROMO, A. K.; KIPKORIR, E. C.; SHITOTE, S. M.; KIBIYI, J. K. Can shelterbelts improve sprinkler irrigation performance under windy semi-arid conditions? **Irrigation and Drainage Systems**. v. 25, p. 335-345, 2011.

VON BERNUTH, R. D. Uniformity design criteria under limited water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**. v.26, n.5, p.1418-1421, 1983.

WALKER, W. R. Explicit sprinkler irrigation uniformity: Efficiency model. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. v.105, n.2, p.129-136, 1979.

WARRICK, A. W. Interrelationships of irrigation uniformity terms. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 109, n. 3, p. 332-337, 1983.

WARRICK, A. W.; HART, W. E.; YATAYEW, M. Calculation of distribution and efficiency for nonuniform irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v.115, n.4, p.674-686, 1989.

YACOUBI S.; ZAYANI, K.; ZAPATA, N.; ZAIRI, A.; SLATNI, A.; SALVADOR, R.; PLAYÁN, E. Day and night time sprinkler irrigated tomato: Irrigation performance and crop yield. **Biosystems Engineering**. v.107, n.1, p.25-35, 2010.

YACOUBI, S.; ZAYANI, K.; SLATNI, A.; PLAYÁN, E. Assessing sprinkler irrigation performance using field evaluations at the Medjerda lower valley of Tunisia. **Engineering**. v.4, n.10, p.682-691, 2012.

ZOLIN, C. A.; COELHO, R. D.; PAULINO, J.; FOLEGATTI, M. V. Economic viability of retrofitting emitters in center pivot irrigation systems. **Engenharia Agrícola**. v.32, n.3, p.602-608. 2012.