



ANTÔNIO REYNALDO DE SOUSA COSTA

**EVALUATION AND VALIDATION OF A PORTABLE
RAINFALL SIMULATOR: COMPARISON OF RAINFALL
CHARACTERISTICS**

**LAVRAS – MG
2022**

ANTONIO REYNALDO DE SOUSA COSTA

**EVALUATION AND VALIDATION OF A PORTABLE RAINFALL SIMULATOR:
COMPARISON OF RAINFALL CHARACTERISTICS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Lívia Alves Alvarenga
Orientadora

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
Coorientador

**LAVRAS – MG
2022**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Costa, Antônio Reynaldo de.

Evaluation and validation of a portable rainfall simulator:
Comparison of rainfall characteristics / Antônio Reynaldo de Costa.
- 2022.
65 p.

Orientador(a): Livia Alves Alvarenga.

Coorientador(a): Michael Silveira Thebaldi.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Chuva simulada. 2. Energia cinética. 3. Velocidade das
gotas. I. Alvarenga, Livia Alves. II. Thebaldi, Michael Silveira. III.
Título.

ANTONIO REYNALDO DE SOUSA COSTA

**EVALUATION AND VALIDATION OF A PORTABLE RAINFALL SIMULATOR:
COMPARISON OF RAINFALL CHARACTERISTICS**

**AVALIAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SIMULADOR DE CHUVAS PORTÁTIL:
COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA CHUVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 06 de setembro de 2022.

Dr. Luiz Antonio Lima UFLA

Dr. Michael Silveira Thebaldi UFLA

Dra. Minella Alves Martins CEMADEN



Profa. Dra. Lívia Alves Alvarenga
Orientadora

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
Coorientador

**LAVRAS – MG
2022**

À minha família, por todo o investimento de tempo, orientação e amor que concretizou a melhor criação possível para um filho encarar a sociedade.

Ao meu avô João Avelino de Sousa (*In memoriam*) e à minha avó Maria Deusa da Silva Souza, que juntos sacrificaram diversos momentos de suas vidas em muito trabalho para disponibilizar a melhor oferta possível aos seus filhos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Dra. Lívia Alves Alvarenga por ter me aceitado como seu orientado e pela sua paciência, confiança e correta orientação para melhor direcionar minhas escolhas.

Ao Dr. Michael Silveira Thebaldi pelo acompanhamento no desenvolvimento deste trabalho com valiosas discussões, sugestões e os ensinamentos motivadores.

Aos professores, Dr. Alberto Colombo e Dr. Luiz Antonio Lima, pela colaboração com a disposição de ferramentas e discussões fundamentais durante as fases de experimento e escrita, deste trabalho.

Ao professor Dr. Gilberto Coelho por dedicar atenção e responder ao contato de um estudante desconhecido de outro estado. Isto foi fundamental e motivou meu interesse nesta experiência.

Ao Dr. Jorge Manuel Guieiro Pereira Isidoro pela valiosa revisão e observações excepcionais que contribuíram para aprimorar o presente trabalho.

Aos colegas do departamento de Recursos Hídricos da UFLA pelos bons momentos de convivência, apesar da pandemia, e por terem contribuído direta ou indiretamente neste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela estrutura e suporte oferecidos.

À CAPES pela bolsa de mestrado (Processo 88887.596157/2020-00).

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

*“As ações do homem são danosas quer pela
ignorância, quer pelos maus desejos”.*

Bertrand Russel

RESUMO GERAL

O simulador de chuvas é um importante equipamento que pode ser aplicado em diversos estudos hidrológicos. Todavia, o conhecimento das propriedades da chuva simulada é imprescindível para assegurar sua aplicação, já que este equipamento deve ser capaz de reproduzir características importantes da chuva natural. Assim, a avaliação do simulador de chuva é essencial para validar o equipamento e sugerir melhorias, e esses resultados são fundamentais para as pesquisas futuras. Neste estudo, avaliou-se, primeiramente, a uniformidade da chuva simulada a partir de diferentes pressões de operação, intensidades da chuva e bocais de pulverização. Logo após, modificou-se a geometria da parcela experimental em busca de melhorar a uniformidade da chuva simulada. Finalmente, foram avaliados os efeitos das alterações de diferentes bocais pulverizadores, pressão de operação e níveis de abertura do disco rotativo na velocidade de impacto das gotas, energia cinética no tempo da chuva (EC_t), intensidade e uniformidade espacial das chuvas simuladas. Constituíram também objetivos do trabalho comparar a chuva artificial com a chuva natural de mesma intensidade. A intensidade da chuva foi avaliada coletando a água na área útil da parcela experimental. Para avaliar a uniformidade da chuva foi utilizado o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). Por fim, um sistema dinâmico de pluviometria foi usado para quantificar a velocidade das gotas e a energia cinética no tempo da chuva. A geometria inicial da parcela experimental era de 0,7 m x 1,0 m (0,70 m²). No entanto, o equipamento foi validado para ser utilizado com uma área experimental menor já que a distribuição da chuva simulada foi melhor representada. Os resultados mostraram que é possível reproduzir chuvas variando entre 75,41 e 102,17 mm·h⁻¹ de intensidades de chuva nos padrões desejados de uniformidade. As chuvas simuladas apresentaram gotas com velocidades condizentes com às de gotas de chuvas naturais. A energia cinética da chuva simulada é menor do que a energia cinética esperada para a chuva natural de mesma intensidade. Verificou-se que a intensidade da chuva simulada é influenciada pelo efeito do bocal, da pressão de operação e do nível de abertura do disco rotativo. A velocidade das gotas, a EC_t e o CUC da chuva simulada são influenciados pelos efeitos de cada tipo de bocal, em cada nível de pressão de operação e cada nível de abertura do disco rotativo. O simulador de chuva não mostrou desempenho satisfatório para reproduzir a EC_t semelhante aos eventos de chuva natural, e isto pode estar relacionado com a baixa velocidade das gotas no momento da pulverização, somado a pouca distância (2,30 m) de deslocamento até o impacto com o solo.

Palavras-chave: Intensidade da chuva, Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, Velocidade das gotas, Energia cinética, Chuva simulada.

GENERAL ABSTRACT

The rainfall simulator is an important instrument, successfully applied to investigate several hydrological processes. However, knowledge of properties of simulated rainfall is essential to ensure the application of the rainfall simulator. This equipment must be able to reproduce important characteristics of natural rainfall. Thus, the evaluation of rainfall simulators is essential to validate the equipment and suggest improvements, and these results are fundamental for future research. In this study, we first evaluated the simulated rainfall uniformity based on different operating pressures, rainfall intensities and spray nozzles. Subsequently, the geometry of the experimental parcel was modified to improve rainfall uniformity. Finally, the effects of different sprayer models, operating pressure and rotating disk opening levels on droplet velocity, time-specific kinetic energy (KE_t), intensity and spatial uniformity of simulated rainfall were evaluated. Artificial rain was comparable the natural rain to same intensity. Rainfall intensity was evaluated by collecting water the effective area of the experimental plot. To evaluate the uniformity of rain, the Christiansen uniformity coefficient (CUC) was used. Finally, the drainage rain gauge system was used to quantify the droplet velocity and the KE_t of rainfall. The initial plot geometry was 0.7 m x 1.0 m (0.7 m²). However, the equipment was validated for use with a smaller experimental area because the simulated rainfall distribution was much better represented. The results showed that it is possible to reproduce a wide range of rainfall intensities in the desired patterns of uniformity. The simulated rainfall presented drops with velocities in accordance with those of drops of natural rainfall. However, the KE_t of simulated rainfall is smaller than the of natural rainfall of the same intensity. It was found that the intensity of rain is influenced by the effect of the spray nozzle, the operating pressure and the opening level of the rotating disc. The droplet velocity, KE_t and CUC of the simulated rainfall are influenced by the effects of each spray nozzle, at each operating pressure level and each rotating disc opening level. The rainfall simulator did not show satisfactory performance to reproduce KE_t similar to natural rain events, and this may be related to the low speed of the drops at the time of spraying, in addition to the short distance (2.30 m) of displacement to the impact with the soil.

Keywords: Rainfall intensity, Christiansen Uniformity Coefficient, Droplet velocity, Kinetic energy, Simulated rainfall.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 1 – *Portable rainfall simulator: a) water applicator system; b) control panel; c) pumping system and d) effective experimental plot* 31
- Figura 2 – *Relationship between rainfall intensity and square root of operating pressure* 35
- Figura 3 – *Spatial distribution of rainfall depth collected under the Veejet 80100 nozzle operating at different pressures: (a) 27.6 kPa, (b) 34.5 kPa, (c) 41.4 kPa, and (d) 48.3 kPa* 36
- Figura 4 – *Spatial distribution of rainfall depth collected under the Veejet 80150 nozzle operating at different pressures: (a) 27.6 kPa, (b) 34.5 kPa, (c) 41.4 kPa, and (d) 48.3 kPa* 37
- Figura 5 – *Spatial distribution of rainfall depth collected under the Veejet 80100 (a) and 80150 (b) emitters operating at a 48.3 kPa pressure* 38

CAPÍTULO 3

- Figura 1 – *Simulador de chuvas portátil*..... 47
- Figura 2 – *Esquema do Sistema dinâmico de pluviometria (UFLA/DRGS)*..... 49
- Figura 3 – *Chuva simulada comparada por correlação à chuva natural*..... 58

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1 – <i>Average and standard deviation of Rainfall intensity (RI), and CUC obtained with nozzles operating at different pressures over an effective plot of 0.70 m².....</i>	34
---	----

CAPÍTULO 3

Tabela 1 – <i>Resumo da ANOVA das características da chuva simulada.....</i>	52
Tabela 2 – <i>Comparação da Intensidade da chuva (mm·h⁻¹) simulada considerando diferentes bocais, aberturas do DR e pressões de operação.....</i>	52
Tabela 3 – <i>Velocidades das gotas da chuva (V) considerando diferentes bocais Veejet, aberturas do DR e pressão de operação.....</i>	53
Tabela 4 – <i>Análise comparativa entre médias de velocidades (m·s⁻¹) considerando os bocais Veejet em combinação com aberturas do DR e pressões de operação.....</i>	54
Tabela 5 – <i>Coefficiente de uniformidade (CU %) considerando diferentes bocais Veejet, aberturas do DR e pressões de operação.....</i>	56
Tabela 6 – <i>Análise da ECtempo (J·m⁻²·h⁻¹) considerando diferentes bocais Veejet, aberturas do DR e pressões de operação.....</i>	57

LISTA DE SIGLAS

CUC	Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (%)
MG	Minas Gerais
EC	Electric Conductivity ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
TDS	Total Dissolved Solids (ppm)
RI	Rainfall Intensity ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)
CU	Coeficiente de uniformidade (%)
ANOVA	Análise de Variância
DR	Disco rotativo

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
pH	Potencial Hidrogeniônico
mPas	Milipascal segundo
Nm	Newton metro
V	Volt
kW	Quilowatts
L	Litro
mm	Milímetro
rpm	Rotações por minute
kPa	QuiloPascal
R ²	Coefficiente de determinação
EC _{tempo}	Energia Cinética pelo tempo de chuva ($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
D ₅₀	Diâmetro médio de partículas (mm)
V _{hi}	Velocidade horizontal ($m \cdot s^{-1}$)
V _{vi}	Velocidade vertical ($m \cdot s^{-1}$)
EC	Energia Cinética ($J \cdot kg$)
EC _{lâmina}	Energia Cinética da lâmina precipitada ($J \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	Introdução geral e referencial teórico	15
1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Características dos eventos de chuvas naturais	17
2.2	Simulador de chuvas	18
2.3	Avaliação da chuva simulada	19
	REFERÊNCIAS	23
CHAPTER 2	Portable rainfall simulator: evaluation and suitability of plot geometry to improve rainfall uniformity	26
1	INTRODUCTION	28
2	MATERIAL AND METHODS	30
2.1	Rainfall Simulator Description	30
2.2	Intensity and Uniformity of Rainfall	31
2.3	Experimental design	32
3	RESULTS AND DISCUSSION	34
3.1	Performance evaluation of the rainfall simulator	34
3.2	Adequacy of the geometry of the rainfall simulator experimental effective plot	37
4	CONCLUSIONS	39
	REFERENCES	40
CAPÍTULO 3	Medição e comparação das propriedades da chuva simulada em um simulador de chuvas portátil	43
1	INTRODUÇÃO	45
2	MATERIAL E MÉTODOS	47
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.1	Análise de variância (ANOVA)	52
4	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	61

CAPÍTULO 1 Introdução geral e referencial teórico

1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo é considerada preocupante, devido a seus impactos, ambiental, econômica e social. Muita ênfase pode ser dada no Brasil, onde a erosão hídrica ocorre com mais frequência e contribui para provocar a redução da produção agrícola, perdas de terras cultiváveis e a contaminação e poluição dos recursos hídricos. Assim, compreender as características das gotas de chuva é extremamente importante. No entanto, isto é tarefa laboriosa com a chuva natural, uma vez que não é possível obter o controle sobre as características no caso das gotas. Uma alternativa está no uso de simuladores de chuvas, que permitem simular chuva com efeito semelhante ao da chuva natural.

O simulador de chuvas é um equipamento que tem histórico bem estabelecido com diversas aplicações em uma variedade de estudos hidrológicos. Esta variedade de aplicações consolidou esses equipamentos como uma ferramenta de pesquisa para a hidrologia, climatologia, geomorfologia e ciência do solo, quando se trata de compreender, por exemplo, a resposta hidrológica do solo durante a chuva.

Um simulador de chuvas deve ser capaz de reproduzir características importantes da chuva natural, sendo sua vantagem a obtenção mais rápida e eficiente de informações pluviométricas. No entanto, algumas das limitações relatadas, geralmente, se restringem ao tamanho da área útil da parcela de solo e a impossibilidade de reproduzir completamente às características dos eventos naturais de chuva. Portanto, o conhecimento das propriedades da chuva artificial também é imprescindível, o que faz com que a avaliação de desempenho do simulador de chuvas seja informação essencial para validação do equipamento e aplicações em pesquisas futuras.

Neste estudo, é apresentado um simulador de chuvas portátil com disco rotativo. Esse equipamento é pressurizado e deve ser capaz de reproduzir chuvas com adequada uniformidade e distribuição de gotas que alcance tamanhos pequenos e grandes, com velocidade inicial diferente de zero e velocidade de impacto sobre o solo semelhante à velocidade terminal natural de gotas de chuva.

Tendo em vista o contexto acima, este trabalho está dividido em capítulos que abordaram uma avaliação completa de um modelo de simulador portátil de chuvas equipado com disco rotativo. Os objetivos definidos foram:

- a) Avaliar o simulador portátil de chuvas quanto à intensidade e uniformidade de chuvas a partir de alterações de diferentes pressões de operação e bocais de pulverização.
- b) Validar o simulador de chuvas em busca de talvez melhorar a uniformidade da chuva por meio de ajustes da geometria da parcela.
- c) Determinar os efeitos de diferentes modelos de pulverizador, pressão de operação e níveis de abertura do disco rotativo nas características da chuva simulada.
- d) Avaliar as chuvas produzidas pelo simulador em termos de velocidade de impacto das gotas, energia cinética específica pelo tempo, intensidade e uniformidade espacial.
- e) Comparar a chuva simulada com a chuva natural de mesma intensidade.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Características dos eventos de chuvas naturais

A precipitação pluvial apresenta como principal atributo a variabilidade tempo-espacial de suas principais características associadas, tais como: duração, intensidade, tempo de retorno e energia cinética dos eventos. Essa variação é resultante de diversos fatores naturais do clima e ainda pode ser influenciada pela ação antrópica (BORTOLIN *et al.*, 2020; BRAMORSKI, CRESTANA, 2020), o que favorece leva a respostas distintas como resultado do contato das gotas de chuva no solo.

Santos, Griebeler e Oliveira (2010), comentam que as ocorrências de precipitações de alta intensidade elevam o risco ocasionado pelo escoamento superficial durante o processo de erosão do solo. Adicionalmente, Gebler *et al.* (2014) afirmam que a erosão hídrica proveniente de chuvas intensas tem ocasionado diversos problemas de ordem ambiental, econômica e social no território brasileiro.

No Brasil, a erosão hídrica do solo ocorre com frequência. Um exemplo é a região Sul do Estado de Minas Gerais, onde a precipitação associada com a topografia e o tipo de solo favorecem o processo erosivo. Nessa região, as chuvas maiores que 10 mm, com intensidade máxima maior que $24 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, em 15 min, ou energia cinética maior que 3600 J são consideradas erosivas (CARDOSO *et al.*, 2012).

Atualmente, a erosão hídrica do solo é um dos problemas ambientais mais preocupantes, pois pode causar perdas de terras agrícolas, redução da produção e contribuir para a contaminação e a poluição dos recursos hídricos (BACK, 2018). A análise dos impactos gerados por esses eventos extremos é importante para a sociedade devido aos processos de erosão do solo, transporte de sedimentos, identificações de áreas de risco para a ocupação humana e dimensionamento de obras hidráulicas (MELLO; VIOLA, 2013).

Os fenômenos relacionados à erosão hídrica do solo podem ser estudados tanto sob chuvas naturais quanto chuvas simuladas a partir de equipamentos (CARVALHO *et al.*, 2015). No entanto, algumas das características das chuvas que influenciam no processo erosivo apresentam complexidade de controle. Isto dificulta os experimentos com chuva natural (LIU *et al.*, 2019). Como alternativa, nos experimentos empregando chuvas simulada foi possível contornar essas limitações, uma vez que a principal vantagem é o controle das condições da chuva, possibilitando, portanto, alcançar um efeito semelhante ao da chuva natural sobre uma parcela do solo (ZHAO; HUANG; WU, 2015).

2.2 Simulador de chuvas

O simulador de chuvas se tornou uma ferramenta de pesquisa essencial para investigar a hidrologia de superfície. Seu uso pode ser considerado bem sucedido, como resposta, ao problema da espera por eventos de chuvas naturais que acontecem de forma esporádica, o que dificultava os estudos científicos (ISERLOH *et al.*, 2013; CONFESSOR; RODRIGUES, 2018).

No Brasil, Alves Sobrinho, Gómez-Macpherson e Gómez (2008), desenvolveram um modelo de simulador de chuva muito utilizado em estudos de erosão do solo (Carvalho *et al.*, 2015; ALMEIDA *et al.*, 2018). O equipamento é composto por cinco módulos independentes que facilitam o transporte e a operação em campo. A aplicação de água é realizada por dois pulverizadores fixos localizados acima de um disco rotativo na altura de 2,3 m em relação a superfície do solo. O disco rotativo influencia a intensidade de aplicação da água e sua rotação é realizada por um motor elétrico. A velocidade de rotação do obturador pode ser ajustada com um inversor de frequência instalado no painel de controle do simulador de chuva. Os autores destacam como vantagens desse modelo: a flexibilidade de uso, maior portabilidade além de simular chuvas e escoamento superficial de forma independente e simultânea em uma ampla gama de intensidades.

Também no Brasil, Bertol, Bertol e Barbosa (2012) construíram uma variação do tradicional simulador de chuvas tipo Swanson (SWANSON, 1965). Este modelo, apresentou alterações projetadas com intuito de viabilizar a dispensa do uso de motor para movimentar as barras com os pulverizadores de água. Também foram feitas alterações no desenho da estrutura do equipamento com objetivo de reduzir o peso e melhorar a manipulação no campo. Assim, o equipamento foi denominado como simulador de chuvas tipo empuxo com braços movidos hidraulicamente, nome que fez referência às modificações realizadas que possibilitaram superar a necessidade de um motor para movimentar as barras rotativas, uma vez que esse movimento passou a ser realizado pelo empuxo provocado pela água que saía dos pulverizadores. Na avaliação de desempenho, os autores relatam que o novo simulador foi capaz de reproduzir chuvas com características semelhantes às chuvas produzidas pelo modelo tipo Swanson e os resultados destacam um equipamento mais leve, econômico, silencioso e de fácil operação.

O vento pode influenciar as gotas da chuva natural em sua trajetória de queda, alterando, portanto, a inclinação, a velocidade e o tamanho das mesmas (ERPUL *et al.*, 2008). Esta relação, inspirou o surgimento de modernos simuladores híbridos, que combinam vento e chuva. Fister *et al.* (2012) construíram um modelo portátil, desses equipamentos, com objetivo de realizar medições de erosão do solo *in situ* por meio de um único dispositivo capaz de exercer

a simulação da erosão eólica ou hídrica, separadamente e também combinadas de maneira simultâneas no mesmo experimento. O simulador elaborado, possuía um túnel de vento portátil que foi integrado com um simulador de chuvas para melhorar a qualidade do fluxo de ar produzido pelo equipamento. A corrente de ar do túnel de vento pode ser gerada por um ventilador de 5,6cv com 163 cm³ e a chuva era produzida por quatro bocais Veejet 80100. Segundo os autores, as características de vento e precipitação, simuladas pelo equipamento, apresentaram boa reprodutibilidade e atenderam as exigências para medidas comparativas de erosão do solo *in situ*.

O simulador de chuvas deve ser capaz de reproduzir características importantes da chuva natural. Assim, para a chuva artificial, algumas características são essenciais, tais como, uma ampla gama de intensidades de precipitação, a variação do tamanho e velocidade de impacto das gotas e a distribuição espacial da chuva na área útil da parcela (ISERLOH *et al.*, 2013). Adicionalmente, Alves Sobrinho, Gómez-Macpherson e Gómez (2008) também destacaram que os simuladores de chuva devem ter baixo consumo de água, controle preciso da intensidade da chuva e reproduzir chuvas com uniformidade de distribuição adequada na área útil da parcela. Neste sentido, a avaliação do simulador de chuvas é imprescindível.

2.3 Avaliação da chuva simulada

O conhecimento das propriedades naturais da chuva simulada é necessário em experimentos com simuladores de chuva, uma vez que, segundo Ries *et al.* (2009), variáveis como a intensidade da chuva, a distribuição do tamanho das gotas, a velocidade de impacto das gotas, a energia cinética e a uniformidade da distribuição espacial da chuva na área útil molhada são dependentes, principalmente, da ponta pulverizadora, da pressão de operação, da altura da queda e da intensidade de aplicação da água.

No estudo de Bertol, Bertol e Barbosa (2012), uma variação do simulador de chuvas tipo Swanson foi avaliada com relação à intensidade da chuva. O desempenho do simulador de chuvas montado com 30 bocais Veejet de modelo 80100 foi ensaiado sob as pressões de 5,3 psi (36,5 kPa), 6,6 psi (45,5 kPa), 7,9 psi (54,5 kPa) e 10,6 psi (73 kPa). Os resultados revelaram que o simulador Tipo Empuxo produziu chuvas de várias intensidades, distribuídas e correlacionadas positivamente de acordo com as pressões de operação registradas nos manômetros instalados nas barras rotativas do equipamento. Assim, 15 emissores operando simultaneamente possibilitaram chuvas com intensidade de 50,5 mm·h⁻¹, 61,3 mm·h⁻¹, 70,4

mm·h⁻¹, 88,0 mm·h⁻¹ e 30 emissores produziram chuvas com intensidades de 103,9 mm·h⁻¹, 124,1 mm·h⁻¹, 138,1 mm·h⁻¹ e 166,5 mm·h⁻¹, respectivamente.

Silveira *et al.* (2017) realizaram um estudo com proposta de desenvolver dois simuladores de chuvas denominados M1 e M2. Neste estudo, foi avaliado a distribuição espacial da chuva artificial afim de averiguar a possibilidade de definir teoricamente o arranjo espacial de múltiplos pulverizadores para obter uma intensidade de chuva com distribuição espacial uniforme. O simulador de chuvas M1 foi projetado com três emissores HH-W ¼ FullJet posicionados a 1,0 m de distância, na altura de 2,5 m da superfície (8,00 m² de área irrigada). O outro equipamento (M2), foi projetado com as mesmas características do M1 para ser operado em uma área útil molhada de 100 m². Assim, três diferentes arranjos de bocais foram testados no M2 para obter uma intensidade de chuva semelhante à obtida com M1. Os resultados mostraram uma intensidade de chuva variando de 76,77 a 82,25 mm·h⁻¹ e distribuição espacial da chuva de 78,9% na avaliação do M1. Na avaliação do M2, o melhor desempenho foi obtido com 16 emissores espaçados de 2,70 m × 2,70 m, onde se observou a intensidade da chuva variando de 75,12 a 76,83 mm·h⁻¹ e distribuição da chuva de 83%. Como o desempenho do simulador de chuvas M2 foi muito próximo do M1, os autores argumentam que o principal objetivo da pesquisa foi alcançado.

Montebeller *et al.* (2001) realizaram uma avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular portátil que, conforme os autores, era semelhante ao modelo descrito no trabalho de Meyer e Harmon (1979). A avaliação de desempenho do equipamento foi realizada no laboratório. Na pesquisa foi investigado o diâmetro volumétrico médio (D₅₀) das gotas das chuvas produzidas pelo equipamento equipado com pulverizadores Veejet de modelos 80100 e 80150, posicionadas na altura de 2,87 m do solo e operando nas pressões de operação de 13,6; 20,4; 27,2 e 34 kPa. Com essas informações, foi determinado o D₅₀ e os resultados mostraram que o pulverizador 80100 produziu gotas com diâmetros variando de 1,5 a 3,6 mm, enquanto o bocal 80150 gerou gotas variando de 1,9 a 3,9 mm de diâmetro. Os autores observaram que os menores D₅₀ obtidos foram registrados na ponta 80100. Outro fato observado foi que na medida em que se elevou a pressão de operação nos pulverizadores o diâmetro das gotas diminuiu.

O estudo de Spohr *et al.* (2015) avaliou a uniformidade da chuva produzida por um pequeno simulador de chuvas portátil, equipado com um pulverizador Veejet 80100 aplicando água na pressão de serviço de 30 kPa, sob parcela útil medindo 1,4 x 1,6 m. O resultado do ensaio apresentou uniformidade de 74,4%, valor que foi considerado baixo. Visando melhorar o desempenho do equipamento, os autores adotaram a estratégia de reduzir a área útil da parcela

alvo do simulador de chuvas para 1,0 x 1,2 m. Assim, os autores observaram que a uniformidade melhorou significativamente.

No estudo de Alves Sobrinho, Gómez-Macpherson e Gómez (2008), o desempenho do simulador de chuvas Infiasper foi avaliado. Neste equipamento, a intensidade de precipitação é configurada por meio de fendas de um obturador rotativo instalado abaixo dos bocais emissores de água. Nestas condições, o coeficiente de uniformidade foi avaliado com dois modelos de bocais Veejet (80100 e 80150), operando em duas pressões de operação (32,7 e 35,6 kPa). A aplicação da água ocorreu sob diferentes aberturas no disco rotativo (aberturas de 50, 75 e 100%). Os resultados obtidos do coeficiente de uniformidade apresentaram valores médios de 83,5%, no pulverizador 80100, e de 82,5%, no pulverizador 80150. Com relação à uniformidade, os autores verificaram melhor desempenho do simulador de chuvas equipado com pulverizadores 80100, quando equipado com pulverizadores 80150.

Colares *et al.* (2016) apresentaram um método alternativo que não requer instrumentação complexa para determinar a velocidade e a energia cinética das gotas de chuva naturais e artificiais. Esses autores utilizaram uma série de pluviômetros acoplados em uma barra rotativa tipo hélice para construir um sistema pluviométrico dinâmico (UFLA-DRGS), que pode ser usado para quantificar as velocidades de queda das gotas de chuvas e estimar a energia cinética da chuva. Nesse trabalho foi avaliado a velocidade das gotas geradas em um simulador de chuvas equipado com 8 pulverizadores Teejet modelo TG SS 14, instalado dentro de um túnel de vento no *Internacional Center of Eremology, Ghent University*. Foram usados disdrômetro PARSIVEL e o UFLA-DRGS instalados em duas posições dentro do túnel de vento para medir a velocidade das gotas de chuva produzida com pressão de água de 1,5 bar (150 kPa) nos emissores e velocidade do vento de $6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Os resultados evidenciaram que as velocidades das gotas medidas em duas posições no túnel de vento com o disdrômetro e com o UFLA-DRGS não foram estatisticamente diferentes.

No estudo de Wacha *et al.* (2021), o instrumento UFLA-DRGS foi usado para estimar energia cinética da chuva e a intensidade de precipitação produzida por um simulador de chuva posicionado a 2,5 m da superfície do solo e equipado com um conjunto de bocais Veejet de modelo 80100 operando na pressão de 41,4 kPa. Esses autores usaram o procedimento do UFLA-DRGS para estimar a energia cinética da chuva simulada e avaliaram os resultados com valores relatados para a chuva natural. Uma sequência de testes com duração de 10 minutos foi realizada e os resultados mostraram uma chuva com uma intensidade média de $72 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. A avaliação da velocidade das gotas mostrou velocidades verticais variando entre $0,76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $9,97 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, valores dentro da faixa de velocidades terminais relatadas para chuvas naturais. A

energia cinética total da chuva simulada, medida com o conjunto de pluviômetros, foi de 860,9 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$.

Petrú e Kalibová (2018) compararam duas abordagens para calcular a energia cinética da chuva: (a) baseada no diâmetro e velocidade de queda das gotas mensuradas em laboratório com chuvas simuladas e (b) derivada a partir de equações empíricas de estudos com chuvas naturais. Para tal, o simulador de chuvas utilizado foi equipado com bocais Veejet 80100 operando a uma pressão de serviço de 41 kPa. A avaliação das características das chuvas simuladas foi feita com disdrômetro ótico modelo Thies. Os resultados mostraram que 94% das gotas da chuva simulada foram menores que 1 mm. Quanto a comparação com a chuva natural, observou-se superestimativa da velocidade de queda de gotas menores e subestimativa da velocidade de gotas maiores. Os autores concluíram que a energia cinética da chuva simulada parece ser subestimada em maiores intensidades.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, W.S.; PANACHUKI, E.; OLIVEIRA, P.T.S.; SILVA, R.M.; ALVES SOBRINHO, T.; CARVALHO, D.F. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 130-138, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>
- ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; GÓMEZ, J.A. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 2, p. 163-170, Jun. 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00150.x>
- ERPUL, G., GABRIELS, D., CORNELIS, W.M., SAMRAY, H.N., GUZELORDU, T. Sand detachment under rains with varying angle of incidence. **Catena**, v. 72, n. 3, p. 413-422, Jan. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.008>
- BACK, A.J. Fator erosividade e características das chuvas erosivas para a Região do Planalto Norte de Santa Catarina. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 31, n. 1, p. 61-66, Jan./Abr. 2018. <http://dx.doi.org/10.22491/RAC.2018.v31n1.8>
- BERTOL, I.; BERTOL, C.; BARBOSA, F.T. Simulador de chuva tipo empuxo com braços movidos hidráulicamente: fabricação e calibração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1905-1910, Dez. 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600024>
- BORTOLIN, T.A.; CORSO, C.C.; MENDES, L.A.; BARBOSA, A.G.; SCHNEIDER, V.E. Determinação de equações de chuvas intensas para a encosta superior do nordeste do Rio Grande do Sul. **Ciência E Natura**, [s. l.], v. 42, p. eB3, Dez. 2020. <https://doi.org/10.5902/2179460X40357>
- BRAMORSKI, J.; CRESTANA, S. Erosão hídrica em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de manejo e chuva simulada. **Revista Sítio Novo**, [s. l.], Palmas, v. 4, n. 2, p. 73-80, Abr./Jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.47236/2594-7036.2020.v4.i2.73-80p>
- CARDOSO, D.P.; SILVA, M.L.N.; CARVALHO, G.J.; FREITAS, D.A.F.; AVANZI, J.C. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n.6, p. 632-638, Jun. 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000600007>
- CARVALHO, D.F.; EDUARDO, E.N.; ALMEIDA, W.D.; SANTOS, L.A.F.; ALVES SOBRINHO, T. Water erosion and soil water infiltration in different stages of corn development and tillage systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1072-1078, Nov. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1072-1078>
- CONFESSOR, J.G.; RODRIGUES, S.C. MÉTODO PARA CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE SIMULADORES DE CHUVAS APLICADOS A ESTUDOS HIDROGÊOMORFOLÓGICOS EM PARCELAS DE EROÇÃO. **Revista Brasileira de**

Geomorfologia, Rondonópolis - MT, v.19, n.1, p.1-8, Jan./Mar. 2018.
<http://dx.doi.org/10.36560/131020201115>

FISTER, W.; ISERLOH, T.; RIES, J.B.; SCHIMIDT, R.-G. A portable wind and rainfall simulator for in situ soil erosion measurements. **CATENA**, v. 91, p. 72-84, Apr. 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.03.002>

GEBLER, L.; BERTOL, I.; BIASI, L. R. de; RAMOS, R. R. e LOUZADA, J. A. S. Transferência superficial de fósforo reativo potencialmente contaminante por chuvas simuladas intensas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 19, n. 4, p. 393-399. Oct./Dec. 2014.
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000000564>.

ISERLOH, T.; RIES, J.B.; ARNÁEZ, J.; BOIX-FAYOS, C.; BUTZEN, V.; CERDÀ, A.; ECHEVERRÍA, M.T.; FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J.; FISTER, W.; GEIBLER, C.; GÓMEZ, J.A.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; KUHN, N.; LÁZARO, R.; LEÓN, F.J.; MARTÍNEZ-MENA, M.; MARTÍNEZ-MURILLO, J.F.; MARZEN, M.; WIRTZ, S. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. **Catena**, v. 110, p. 100-112, Nov. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013>

COLARES, M.D.F.B.; LIMA, L.A.; LIMA, P.L.T.; LEMOS, L. T. O.; RIKEN, N., & VERDOODT, A. Velocity of simulated raindrops in a wind tunnel measured by different technologies. *In: 10th International Symposium on Agriculture and the Environment, 2016, Purdue University. Anais*. Indiana: Purdue University, May 23-27, 2016.

LIU, Y.; XIN, Y.; XIE, Y.; WANG, W. Effects of slope and rainfall intensity on runoff and soil erosion from furrow diking under simulated rainfall. **Catena**, v. 177, p. 92-100, Jun. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.004>

MELLO, C.R.; VIOLA, M.R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 37-44, Fev. 2013.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100004>

MEYER, L.D; HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, n.1, p.100-103, 1979.
<https://doi.org/10.13031/2013.34973>

MONTEBELLER, C.A; CARVALHO, D.F.; ALVES SOBRINHO, T.; NUNES, A.C.S.; RUBIO, E. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 1-5, Abr. 2001. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000100001>

PETRÚ, J., KALIBOVÁ, J. Measurement and computation of kinetic energy of simulated rainfall in comparison with natural rainfall. **Soil & Water Res.**, v. 13, n.4, p.226-233, Jul. 2018.
<https://doi.org/10.17221/218/2016-SWR>

RIES, J.B.; SEEGER, M.; ISERLOH, T.; WISTORF, S. FISTER, W. Calibration of simulated rainfall characteristics for the study of soil erosion on agricultural land. **Soil & Tillage Research**, 106, p.109-116, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.07.005>

SANTOS, G.G.; GRIEBELER, N.P.A.; OLIVEIRA, L. F. C. de. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 115-123, Fev. 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000200001>

SILVEIRA, A.; ISIDORO, J.M.G.P.; DE DEUS, F.P.; DOS REIS, S.S.; SILVA, A.M.D.; GONÇALVES, F.A.; MENEZES, P.H.B.J. and TIEZZI, R.D.O. Enhancing the spatial rainfall uniformity of pressurized nozzle simulators. **Management of Environmental Quality**, v. 28, n. 1, p. 17-31, 2017. <https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2015-0140>

SPOHR, R.B.; CORCINI, A.L.M.; PELLEGRIN, J.; BONFANTI, J.B.; DAL SOTO, M.F.; CARDOSO, T. Desenvolvimento e validação de um simulador de chuvas portátil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre – RS, v. 20, n. 2, p. 411-417, Abr./Jun. 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n2.p411-417>

SWANSON, N. P. Rotating-Boom Rainfall Simulator. **Transactions of the ASAE**, v.8, n.1, p. 71–72, 1965. <https://doi.org/10.13031/2013.40430>

WACHA, K.M.; HUANG, C.; O'BRIEN, P.L.; PAPANICOLAOU, A.N. e HATFIELD, J.L. Quantifying the time-specific kinetic energy of simulated rainfall using a dynamic rain gauge system. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 6, e20042, 2021. <https://doi.org/10.1002/ael2.20042>

ZHAO, L.; HUANG, C.; WU, F. Effect of microrelief on water erosion and their changes during rainfall. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, n. 5, p. 579–586, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3844>

CHAPTER 2 Portable rainfall simulator: evaluation and suitability of plot geometry to improve rainfall uniformity

CAPÍTULO 2 Simulador de chuva portátil: avaliação e adequação da geometria da parcela para melhorar a uniformidade da chuva

ABSTRACT

Rainfall simulators are very important tool in many areas of geosciences. Authors of most of the studies with rainfall simulators try to get the most uniform distribution of precipitation as possible. However, since this is very difficult, indexes are used to assess the greater or lesser uniformity of precipitation in the plot area under study. One of the most used indexes is the Christiansen Coefficient of Uniformity (CUC). In this work, changes in the geometry of the wetted area of the plot were analyzed to improve the uniformity of precipitation. This was evaluated through the intensity of precipitation and CUC in the wet area. The tests were carried out using two models of spray nozzles and different operating pressures. The initial plot geometry was 0.7 m x 1.0 m (0.7 m²). The CUC results were classified as low, while the best performance in terms of precipitation uniformity was obtained at a pressure of 48.3 kPa. Non-uniform precipitation was observable near the outer limits of the plot. Based on the best CUC results, it was proposed to reduce the effective area of the experimental plot from 0.70 m² to 0.56 m², leading to a precipitation intensity of 114.07 and 149.20 mm·h⁻¹, and a CUC of 81.6 and 83.8%, with the two models of spray nozzles. The results showed that adjusting the geometry of the plot can lead, in a simple and fast way, to a better uniformity of artificial rainfall.

Keywords: Simulated rainfall. Christiansen Uniformity Coefficient (CUC). Spraying nozzles. Rainfall uniformity. Plot geometry.

Resumo

Os simuladores de chuva são uma importante ferramenta para várias áreas das geociências. Os autores da maioria das pesquisas com simuladores de chuva tentam conseguir uma distribuição da precipitação o mais uniforme possível. Contudo, sendo tal muito difícil, são utilizados índices que visam aferir a maior ou menor uniformidade da precipitação na área da parcela em estudo. Um dos mais utilizados é o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). Neste trabalho foram analisadas possíveis alterações da geometria da área molhada da parcela para melhorar a uniformidade da precipitação. Isto foi avaliado através da intensidade da precipitação e do CUC na área molhada da parcela. Os testes foram realizados utilizando dois modelos de bicos pulverizadores e diferentes pressões de operação. A geometria inicial da parcela era de 0.7 m x 1.0 m (0.70 m²). Os resultados do CUC foram classificados como baixo, enquanto que o melhor desempenho em termos de uniformidade de precipitação foi obtido a uma pressão de 48.3 kPa. A precipitação com menor uniformidade foi observável próximo dos limites externos da parcela. Com base nos melhores resultados do CUC, propôs-se reduzir a área útil da parcela experimental de 0.70 m² para 0.56 m², levando a uma intensidade de precipitação de 114.07 e 149.20 mm·h⁻¹, e CUC de 81.6 e 83.8 % para os dois modelos de bicos pulverizadores. Os resultados mostraram que proceder a ajustes na geometria da parcela pode conduzir, de uma forma simples e rápida, a uma maior uniformidade da precipitação artificial.

Palavras-chave: Chuva simulada. Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). Pontas pulverizadoras. Uniformidade da precipitação. Geometria da parcela.

1 INTRODUCTION

Rainfall simulator is an important instrument, successfully applied in research to study several hydrological processes such as soil erosion (YU *et al.*, 2021), infiltration (MENDES *et al.*, 2021), surface runoff (HAN *et al.*, 2021), urban drainage (ISIDORO; SILVEIRA; LIMA, 2022), and on hydrological modelling (MORAES *et al.*, 2019). Rainfall simulators allow rainfall characteristics to be controlled, seeking a similar effect to natural rainfall on a soil plot (ZHAO; HUANG; WU, 2015). This type of equipment makes obtaining data without waiting for natural rainfall allows, which occur sporadically (CONFESSOR; RODRIGUES, 2018).

A rainfall simulator must be able to reproduce important characteristics of natural rainfall. The evaluation of rainfall simulators is essential to suggest improvements in the equipment, and these results are fundamental for future research. Despite rainfall simulators have been used for many decades, it must be emphasized that recent advances in research with rainfall simulators can be committed to the improvement of the equipment.

Alves Sobrinho, Ferreira and Pruski (2002) developed a portable rainfall simulator, called InfiAsper, capable to reproduce rainfall intensities up to $100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, with similar characteristics to a natural rainfall, and with a Christiansen Uniformity Coefficient (CUC) ranging from 82 to 87% in an experimental plot of 0.7 m^2 . Alves Sobrinho, Gómez-Macpherson and Gómez (2008) proposed improvements to the InfiAsper rainfall simulator, where the main changes were the replacement of mechanical and analogical controls for electronics, addition of a lighter adjustable rotating disc, and integration of a surface flow module. Isidoro and De Lima (2015) developed a hydraulic system to stabilize pressure when using spraying nozzles in rainfall simulators. More recently, Macedo *et al.* (2021) studied the InfiAsper rainfall simulator and made improvements to implement an automatic rainfall intensity control system. This system regulates the rotation of the disk and allows the simulation of different rainfall patterns with CUC higher than 75%.

Some limitations of rainfall simulation are usually restricted to the size experimental of plot and the impossibility to completely replicate natural rainfall characteristics. The novelty of this study is to propose adjustments in the geometry of the experimental plot to obtain higher rainfall uniformity. Thus, CUC value can be established according to the variation of the experimental plot size. The experimental plot size with an acceptable CUC value can be used in different studies and applications. In general, rainfall simulators with smaller experimental plots have higher CUC values (KIM *et al.*, 2018). Sousa Junior *et al.* (2017) and Mendes *et al.* (2021) showed that CUC above 70% is sufficient for a 3.0 m^2 plot area. Spohr *et al.* (2015) and

Tossell *et al.* (1987) considered 80% as the minimum CUC for simulators with 1.2 m² and 1.0 m² of plot effective areas. Iserloh *et al.* (2013) also argued that a well-distributed rainfall, i.e. with CUC above 80% is essential for experiments with portable rainfall simulators.

The spatial uniformity of simulated rainfall depends on several factors such as, rainfall intensity, size of the experimental plot effective area, nozzle orifice diameter, and operating pressure (ISERLOH *et al.*, 2021). Therefore, this work aimed to: (1) Evaluate a portable rainfall simulator regarding the intensity and uniformity of the artificial rainfall produced with different operating pressures and spraying nozzles, and (2) establish for a higher rainfall uniformity (quantified by CUC) through adjustments of the plot geometry.

2 MATERIAL AND METHODS

The evaluation of rainfall uniformity using the portable rainfall simulator took place from May to December 2021. The experiments were carried out at the Irrigation Laboratory of the Department of Water Resources at the Federal University of Lavras, MG, Brazil (latitude 21°13'41.4" S, longitude 44°59'28.6"W, and altitude 845 m). During the tests, air temperature and relative humidity average values were 22.6 °C and 63 %, respectively. Water quality in the reservoir coupled to the simulator was also monitored. Average values are summarized: pH (7.5), temperature (22.3 °C), electrical conductivity (105.1 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), and total dissolved solids (52.3 ppm). In situ monitoring was made with a thermos-hygrometer model HT-600 (INSTRUTHERM) and by a pH/EC/TDS meter model HI98129 (Hanna). The water viscosity is 0.95 m·Pas and surface tension is 7.24 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2018).

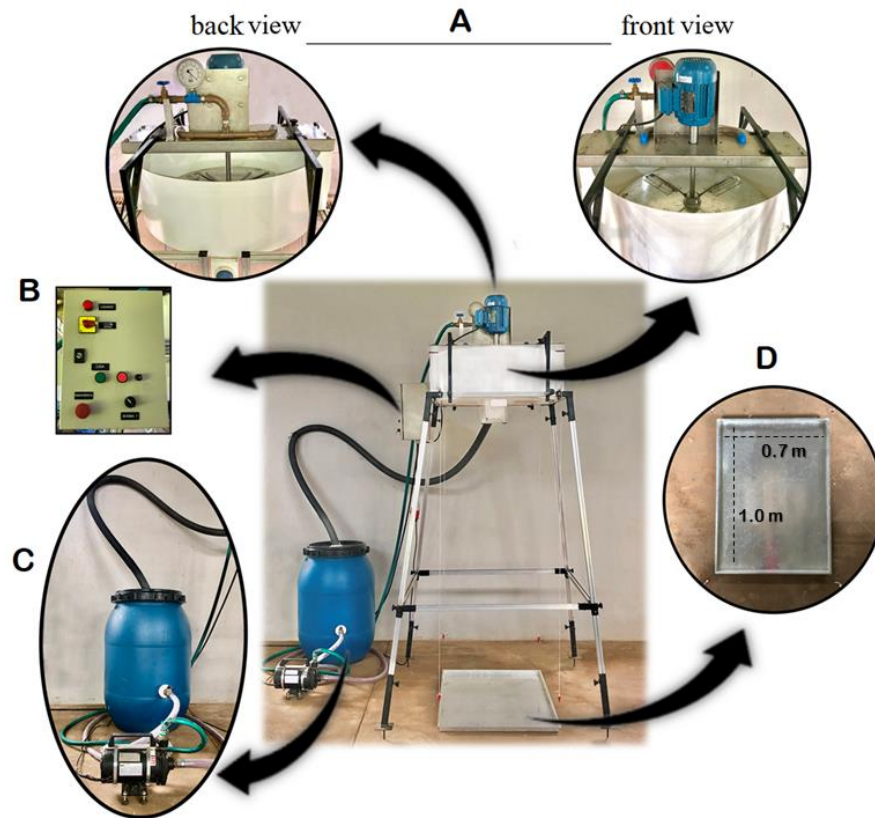
2.1 Rainfall Simulator Description

The original structure of the rainfall simulator is similar to the one developed by Alves Sobrinho, Gómez-Macpherson and Gómez (2008). The equipment is pressurized and follows the same dynamics of water application in a plot of 0.7 m². This rainfall simulator model is capable of generating a droplet distribution that comprises small and large sizes, with non-zero initial velocity, and impact velocity over the plot similar to the natural terminal velocity of a raindrop. This equipment (Figure 1) is composed by a set of independent parts, i.e., support structure, calibration and collection system, electrical network, pumping system, and water application components.

The support structure is assembled with steel piper that can be adjusted by a telescopic system to level the equipment over the ground level, and adjust the height of the nozzles up to 2.30 m over the experimental plot surface. The electrical system operates two phases (220 V), and is controlled by a panel equipped with a variable frequency driver and circuit breakers that activate both a water pump (0.55 kW) and an electric motor (0.55 kW) that moves the rotating disk.

The water pumping system consists of a 150 L reservoir, a centrifugal water pump, gate valve, anti-vibration manometer, and a water application device with two nozzles. The water flows through hoses to from the reservoir the nozzles, where it is sprayed over a steel rotating disk containing four adjustable windows that regulates the rainfall intensity and maintains constant application of water.

Figure 1. Portable rainfall simulator: A) water applicator system; B) control panel; C) pumping system, and D) effective experimental plot.



Fonte: Do autor (2022).

The excess water over the rotating disk flows by gravity back to the reservoir through a drain tube. The nozzles flowrate can be regulated by a gate valve. Finally, the plot is a metal plate 0.7 m wide, 1 m long (0.7 m²) and 0.16 m tall, that must be centered below the rainfall application system. This set allows to adjust and calibrate the rainfall intensity.

2.2 Intensity and Uniformity of Rainfall

The equipment was preliminary tested to check the resulting rainfall intensity for different operating pressures. Two flat fan type spraying nozzles were used: two units of a Veejet 80100 model with the diameter of 4.8 mm, and two units of a Veejet 80150 with the diameter of 6.2 mm (Spraying Systems Company). These spraying nozzles have wide spray pattern, with a nominal spray angle of approximately 80°. The nozzles have a limitation in the spray pattern from a radius of 1.0 m regarding the center of the fixed nozzle (MEYER; HARMON, 1979). The rainfall simulator was configured by adjusting the maximum opening of the four windows of the rotating disk, with a rotation velocity of 121 rpm. Rainfall was generated by applying water under the operating pressures of 27.6, 34.5, 41.4, and 48.3 kPa.

Before each test, the operating pressure was adjusted and then maintained during a 30 s rainfall event, to ensure a steady state flow. During this procedure, the samples cups were protected from receiving rainfall water. Rainfall intensity was estimated from the ratio between the volume of water collected during the test event (five minutes of duration) and the size of the wetted effective area of plot.

The simulated rainfall uniformity was evaluated according to the Christiansen Uniformity Coefficient (CUC) (CHRISTIANSEN, 1942). The rainfall tests were carried out with a duration of 10 minutes, and the water depths were obtained by weighing the collected water from the collecting cups, which were distributed uniformly throughout the wetted effective plot area (0.7 m²). All the tests were replicated three times, to ensure statistical representativity. To transform mass into volume, the density of water of 1.0 g/cm³ was considered. The CUC was calculated by Equation 1:

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

Where:

CUC – Christiansen Uniformity Coefficient (%);

X_i – water depth in each cup (mm);

\bar{X} – average water depth in the cups (mm);

n – number of cups.

2.3 Experimental design

CUC values were obtained by collecting the water depth for 10 minutes, using samples cups with an area of 50.26 cm², uniformly distributed in the plot effective area. 20 collecting cups were placed orthogonally (4 × 5) with spacing of 0.20 m and 0.17 m (length and width), along the initial wetted area (0.7 m²). The operating pressure was changed (27.6, 34.5, 41.4, and 48.3 kPa) to verify how it affected the artificial rainfall uniformity. A minimum limit value for CUC of 80% was set as a criterion to achieve a good performance of the equipment. The best CUC values will be selected at each operating pressure to aid in the validation of the equipment.

The strategy of reducing the wetted area of the experimental plot was used for further evaluation to improve the rainfall distribution. The rectangular wetted area was reduced to 0.56

m² (0.7 m x 0.8 m). Then, tests to verify the artificial rainfall uniformity were carried out with 16 collecting cups (4 x 4 mesh) but keeping the same spacing (0.20 m and 0.17 m). The validation of the rainfall simulator will be carried out with 0.56 m² wetted area, under the operating pressure that resulted in the best rainfall uniformity in the 0.7 m² wetted area.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Performance evaluation of the rainfall simulator

Rainfall intensities, CUC averages, and standard deviations are shown in Table 1. These results were obtained to evaluate the performance of the rainfall simulator under different operating pressures.

Table 1. Average and standard deviation of Rainfall intensity (RI), and CUC obtained with nozzles operating at different pressures over an effective plot of 0.70 m².

Pressure (kPa)	Nozzle (Veejet) 80100 ^a / 80150 ^b			
	RI (mm h ⁻¹)		CUC (%)	
27.6	75.41 ^a ± 0.69	102.87 ^b ± 0.78	70.14 ^a ± 0.79	73.89 ^b ± 0.54
34.5	82.59 ^a ± 0.24	119.41 ^b ± 0.40	72.27 ^a ± 0.11	75.07 ^b ± 0.39
41.4	92.53 ^a ± 0.74	133.76 ^b ± 0.35	72.87 ^a ± 0.26	75.00 ^b ± 0.34
48.3	102.17 ^a ± 0.40	143.54 ^b ± 0.51	74.97 ^a ± 0.75	77.33 ^b ± 0.63

Note: Lowercase letters represent results from Veejet 80100 (a) and 80150 (b) emitters.

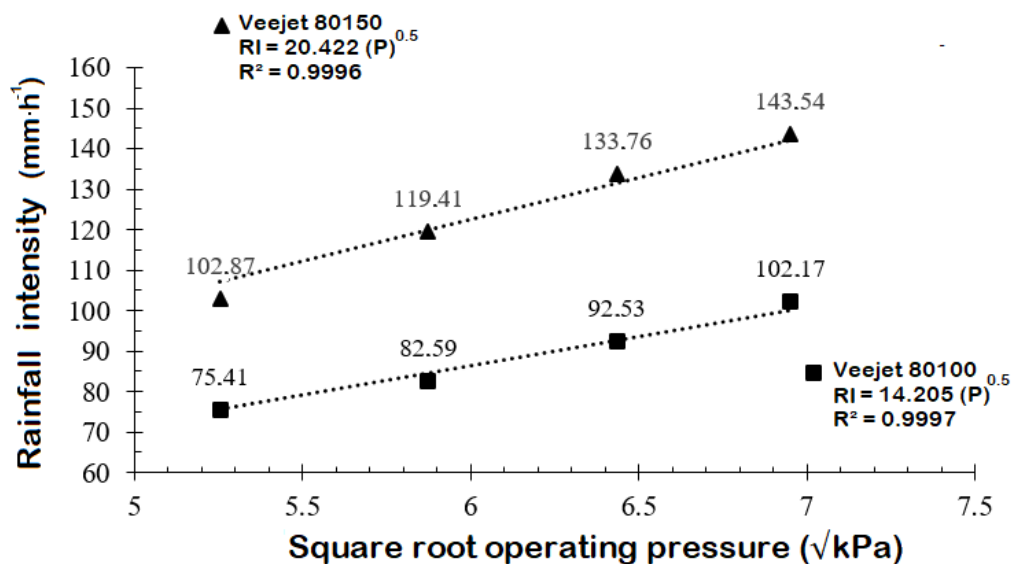
The standard deviation for rainfall intensity and CUC were low, ranging from 0.24 to 0.78 mm·h⁻¹, and 0.11 to 0.79%, respectively. The environmental control (i.e., wind, temperature, relative humidity, etc.) was possible because the tests were conducted in an indoor laboratory. Other authors conducted studies with rainfall simulators in uncontrolled environments. Examples of this are Alves Sobrinho, Gómez-Macpherson and Gómez (2008) and Sporch *et al.* (2015), where the artificial rainfall characteristics showed a higher variability with standard deviations of 1.2 to 2.4 mm·h⁻¹ for rainfall intensity and from 1.2 to 3.1 in CUC, in the first study, and with a variability of 6% for rainfall intensity in the second study.

Water flow rate of a nozzle (discharge) is proportional to the product of nozzle orifice area to the square root of the operating pressure. Thus, a linear relationship is expected between the rainfall intensity and pressure square root, as observed in Figure 2. The high R² values obtained ensure the quality of the measurements carried out in the laboratory, as also shown in Table 1.

Regarding the CUC all tests resulted in values considered “poor” according to the criteria proposed by Little *et al.* (1993), i.e., between 70 % and 79 %. The uniformity test showed that the rainfall simulator performed better when equipped with a Veejet model 80150 spraying nozzle, compared to the 80100 model. This may be a result of the droplets diameter produced, since spraying nozzles with larger openings, as Veejet 80150 when compared to 80100 produce larger droplets (MEYER; HARMON, 1979), and this may have influenced the

rainfall uniformity over the effective plot area. In Alves Sobrinho, Gómez-Macpherson and Gómez (2008), a slightly higher CUC was obtained when the equipment was assembled with the Veejet 80100 spraying nozzles (1% higher in the overall average regarding the Veejet 80150 nozzle). However, this difference did not assure a better rainfall uniformity, as a higher standard deviation for Veejet 80150 can be observed when compared to the Veejet 80100 nozzle. These results may have been influenced by external factors such as temperature, relative humidity, wind, electric power fluctuations, due to the tests being carried out in an uncontrolled environment.

Figure 2. Relationship between rainfall intensity and square root of operating pressure.



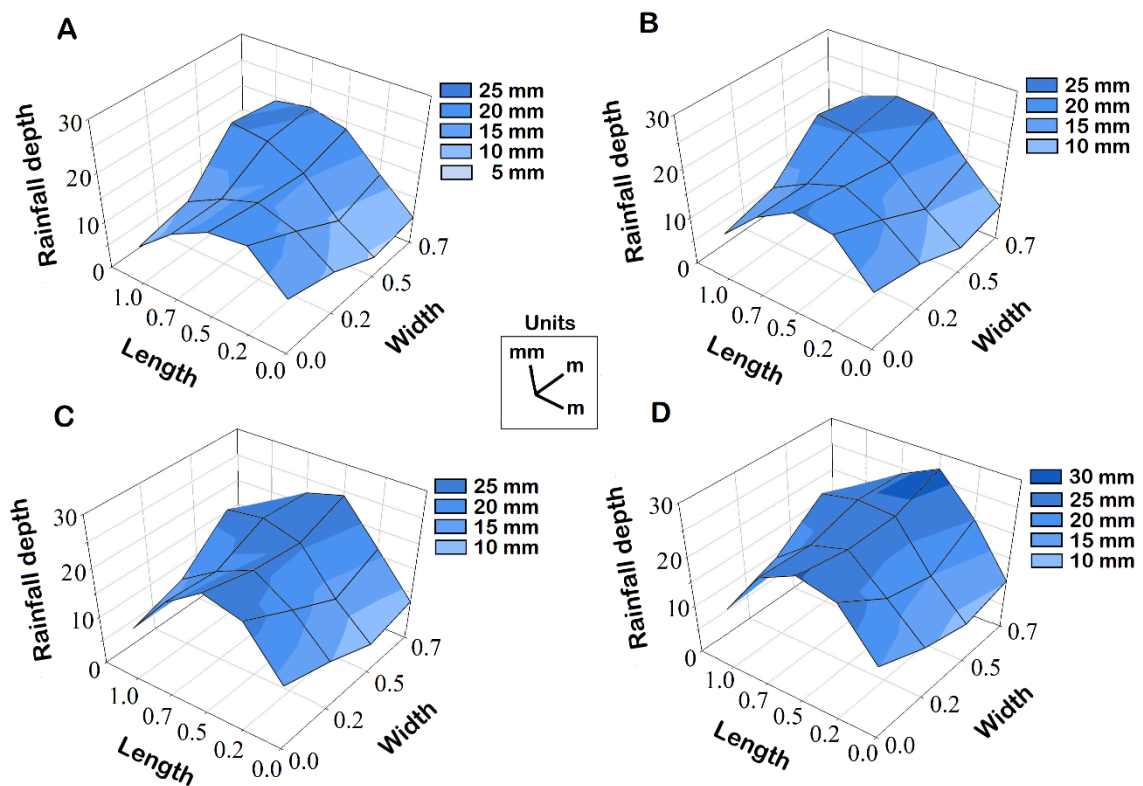
Fonte: Do autor (2022).

It was found that higher operating pressure led to better rainfall uniformities. Thus, CUC reached the highest values for 48.3 kPa of operating pressure, both for the Veejet 800100 and 80150 spraying nozzles. This confirms the findings of Montebeller *et al.* (2001) who attributed these findings to the larger wetted area, due to the pressure increase. Moreover, lower water pressures generate rainfall with coarser droplets with a smaller wetted area (CONFESSOR; RODRIGUES, 2018).

The spatial distribution of rainfall depth measured under the Veejet 80100 spraying nozzle, under different operating pressures, is shown in Figure 3. The values correspond to the average rainfall depth obtained the by collecting cups positioned over the effective plot area. Globally, rainfall depths varying between 5 and 30 mm were observed during a 10-minute application. It was noticed higher volume of water at central region and water deficit at edges of the experimental plot, under different operating pressures, similarly to these observed by

Spohr *et al.* (2015). Thus, the best CUC result (74.97%) was obtained with an operating pressure of 48.3 kPa, and may be explained by the smaller droplets, well distributed over the effective plot area.

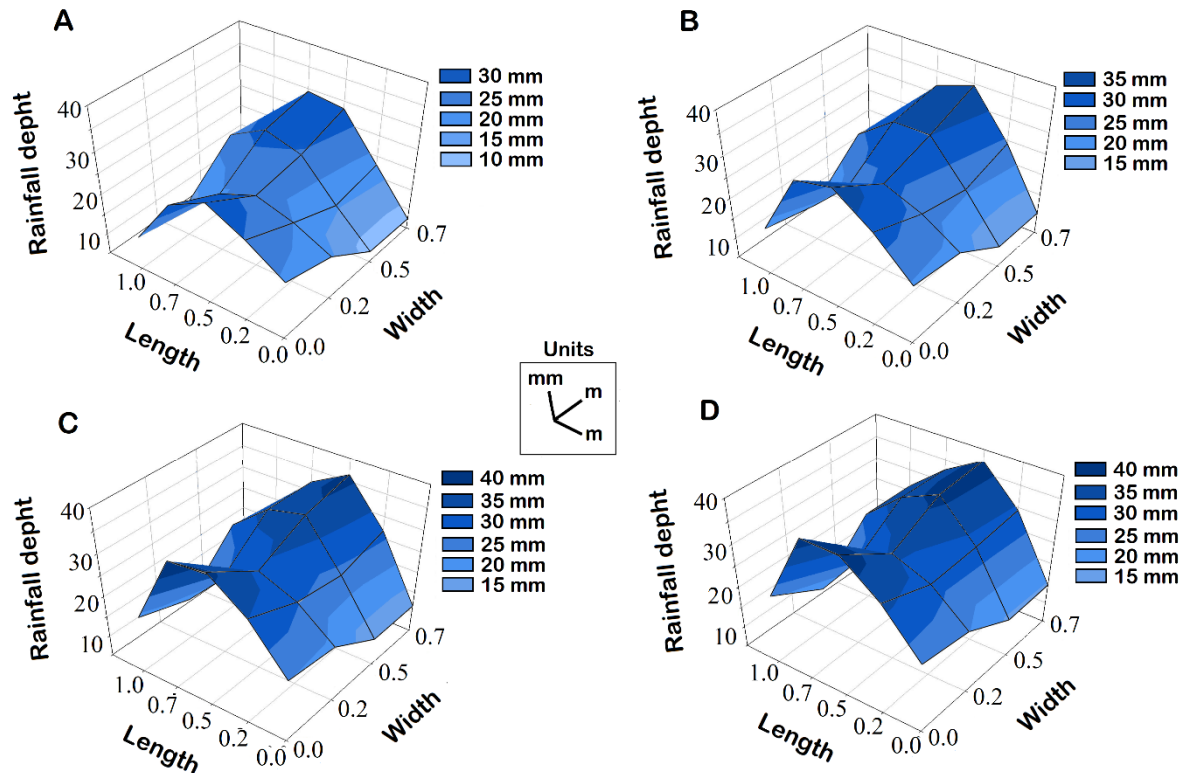
Figure 3. Spatial distribution of rainfall depth collected under the Veejet 80100 nozzle operating at different pressures: (a) 27.6 kPa, (b) 34.5 kPa, (c) 41.4 kPa, and (d) 48.3 kPa.



Fonte: Do autor (2022).

Figure 4 shows the rainfall spatial distribution over the wetted area when using the spraying nozzle model 80150, operating under different pressures. Similar results were observed when using the 80100 nozzle, i.e., higher depths of water in the center and a deficit at the edges of the experimental plot. However, the water depth peaks were higher than those produced by the Veejet 80100 under the same operating pressures. This result was similar to Macedo *et al.* (2021), where a higher rainfall concentrated at center of the experimental plot was also observed. Meyer and Harmon (1979) evaluated the intensity distribution of the spray pattern of Veejet nozzles models 80100 and 80150. These authors found that the intensity distribution varied across the action range (0.9 m) of the nozzle pattern. Thus, the spray pattern of these nozzles is characterized by more water at center of the sprayed area and less at the edges.

Figure 4. Spatial distribution of rainfall depth collected under the Veejet 80150 emitter operating at different pressures: (a) 27.6 kPa, (b) 34.5 kPa, (c) 41.4 kPa, and (d) 48.3 kPa.



Fonte: Do autor (2022).

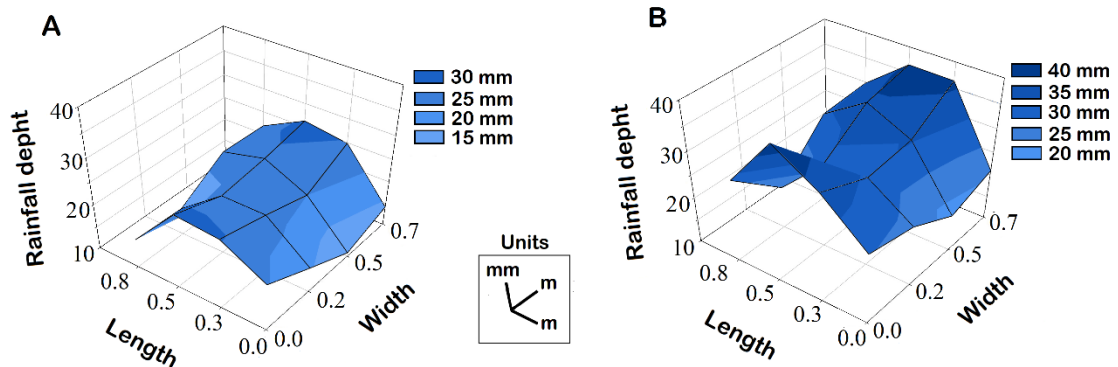
The evaluation of rainfall uniformity showed that the operating pressures of 34.5, 41.4, and 48.3 kPa led to CUC values higher than 75%, with the highest value (77.33%) obtained with the 80150 nozzle under the highest pressure (48.3 kPa). Macedo et al. (2021) stated that CUC higher than 75% indicate adequacy of the rainfall simulator to represent rainfall events. However, regarding the improvement of rainfall uniformity in small rainfall simulators, Spohr *et al.* (2015), concluded that CUC greater than 80% should be considered as an adequacy criterion.

3.2 Adequacy of the geometry of the rainfall simulator experimental effective plot

The asymmetry observed in the spray pattern produced by the nozzles, especially at the edges of the 0.7 m² plot, influenced the performance of the simulator related to spatial uniformity of rainfall. There is no minimum plot-size rainfall simulation well-specified in the literature. Mhaske, Pathak and Basak (2019) state that most small-scale portable rainfall simulators (as in this study) have an effective plot around 0.5 to 1.0 m². Smith (1976) reports that experiments where the plot area is smaller than 0.5 m² are subject to biased results. Therefore, this is an important argument that was considered in this research. The effective area

was reduced by 0.1 m at both sides of the plot. Thus, the proposed new plot has a rectangular shape with a total area of 0.56 m². Considering this new plot area, rainfall intensity and CUC were re-evaluated under a pressure of 48.3 kPa. The rainfall spatial distributions obtained with the Veejet 80100 and 80150 nozzles are presented in Figure 5.

Figure 5. Spatial distribution of rainfall depth collected under the Veejet 80100 (a) and 80150 (b) emitters operating at a 48.3 kPa pressure.



Fonte: Do autor (2022).

The results show an average rainfall intensity of 114.07 (± 0.16) mm·h⁻¹ and 149.20 (± 0.72) mm·h⁻¹, respectively for the 80100 and 80150 nozzles. These values are higher when compared to the results obtained in the experimental area of 0.70 m². A higher rainfall intensity was observed with the optimization of the effective plot. CUC results were also higher, with an average of 81.66 and 83.84% for the 80100 and 80150 nozzles, respectively. It becomes clear that the simulator shows a better performance with the smaller experimental plot area, as rainfall uniformity efficiency increased by approximately 9% and 8%, respectively for Veejet 80100 and 80150 nozzles.

4 CONCLUSIONS

An evaluation of rainfall intensity and uniformity produced by a portable rainfall simulator equipped with Veejet 80100 and 80150 spray nozzles was carried out. For an effective plot of 0.7 m², generally, CUC increased, ranging from 70.14 to 77.33%, with increasing operating pressure. The CUC results were classified as poor and the best performance of the equipment regarding rainfall uniformity was obtained at an operating pressure of 48.3 kPa.

To achieve a more uniform spatial distribution of rainfall (i.e., higher CUC) the effective plot area was reduced from 0.70 m² to 0.56 m². The tests with a plot area of 0.56 m² under an operating pressure of 48.3 kPa, resulted in rainfall intensities of 114.07 and 149.20 mm·h⁻¹, with a CUC of 81.66 and 83.84%, respectively, using the Veejet 80100 and 80150 nozzles. These results show that it is important to consider both the operating pressure and the plot wetted area, when using rainfall simulators, as a proper selection of these variables can lead to a more uniform spatial distribution of the artificial rainfall.

REFERENCES

- ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P. A. e PRUSKI, F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 337-344, 2002. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000200025>
- ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H. e GÓMEZ, J. A. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 2, p. 163-170, Jun. 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00150.x>
- AZEVEDO NETTO, J. M. de e FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, M. **Manual de hidráulica** [livro eletrônico]. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 632p.
- CONFESSOR, J. G.; RODRIGUES, S. C. MÉTODO PARA CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE SIMULADORES DE CHUVAS APLICADOS A ESTUDOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS EM PARCELAS DE EROÇÃO. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Rondonópolis - MT, v. 19, n. 1, p.1-8, Jan./Mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.36560/131020201115>
- CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, Bulletin 670, 1942. 124p.
- HAN, D.; DENG, J.; GU, C.; MU, X.; GAO, P. GAO, J. Effect of shrub-grass vegetation coverage and slope gradient on runoff and sediment yield under simulated rainfall. **International Journal of Sediment Research**, v. 36, n. 1, p. 29-37. Feb. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.05.004>
- ISERLOH, T., ISIDORO, J. M. G. P., DE LIMA, J. L. M. P., MARZEN, M., DE LIMA, M. I. P., GREEN, D., SEEGER, M., AND RIES, J. B. Moving towards harmonisation in rainfall simulation. **EGU General Assembly 2021**, online, EGU21-5667, Apr 2021. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-5667>, 2021
- ISERLOH, T.; RIES, J. B.; ARNÁEZ, J.; BOIX-FAYOS, C.; BUTZEN, V.; CERDÀ, A.; ECHEVERRÍA, M. T.; FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J.; FISTER, W.; GEIßLER, C.; GÓMEZ, J. A.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; KUHN, N.; LÁZARO, R.; LEÓN, F. J.; MARTÍNEZ-MENA, M.; MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; MARZEN, M.; WIRTZ, S. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. **Catena**, v. 110, p. 100-112, Nov. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013>
- ISIDORO, J. M. G. P. AND DE LIMA, J. L. M. P. Hydraulic system to ensure constant rainfall intensity (over time) when using nozzle rainfall simulators. **Hydrology Research**, v. 46, n. 5, 705-710. Oct. 2015. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.087>

- ISIDORO, J. M. G. P.; SILVEIRA, A. AND LIMA, B. O. Development of a large-scale rainfall simulator for urban hydrology research. **Engenharia Sanitaria e Ambiental** [online], v. 27, n. 1, pp. 169-173, Jan./Feb. 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200365>
- KIM, H; KO, T; JEONG, H and YE, S. The Development of a Methodology for Calibrating a Large-Scale Laboratory Rainfall Simulator. **Atmosphere**, v. 9, n. 11, 427, Nov. 2018. <https://doi.org/10.3390/atmos9110427>
- LITTLE, G.; HILLS, D.; HANSON, B. Uniformity in pressurised irrigation systems depends on design and installation. **Californian Agriculture**, v.47, n. 2, p.18–21, May./Jun. 1993.
- MACEDO, P. M. S.; PINTO, M. F.; ALVES SOBRINHO, T.; SCHULTZ, N.; COUTINHO, T.A.R. & CARVALHO, D.F. de. A modified portable rainfall simulator for soil erosion assessment under different rainfall patterns. **Journal of Hydrology**, v. 596, 126052, May. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126052>
- MENDES, T. A.; PEREIRA, S. A. dos S.; REBOLLEDO, J. F. R.; GITIRANA JR, G. de F. N.; MELO, M. T. da S.; LUZ, M. P. da. Development of a Rainfall and Runoff Simulator for Performing Hydrological and Geotechnical Tests. **Sustainability**, v. 13, n. 6, 3060, Mar. 2021. <https://doi.org/10.3390/su13063060>
- MEYER, L. D. and HARMON, W. C. Multiple-Intensity Rainfall Simulator for Erosion Research on Row Sideslopes. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 22 n. 1, p. 100-103, 1979. <https://doi.org/10.13031/2013.34973>
- MHASKE, S. N.; PATHAK, K.; BASAK, A. A comprehensive design of rainfall for the assessment of soil erosion in the laboratory. **Catena**, v. 172, p. 408-420, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.039>
- MONTEBELLER, C. A; CARVALHO, D.F. de.; ALVES SOBRINHO, T.; NUNES, A. C. da S. e RUBIO, E. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 1-5, Abr. 2001. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000100001>
- MORAES, A. G. L.; CARVALHO, D. F. de; ANTUNES, M. A. H.; CEDDIA, M. B. & FLANAGAN, D. C. Steady infiltration rate spatial modeling from remote sensing data and terrain attributes in Southeast Brazil. **Geoderma Regional**, v. 20, e00242, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00242>
- SMITH, R.E. Approximations for vertical infiltration rate patterns. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 19, n. 3, p.505-509, 1976. <https://doi.org/10.13031/2013.36058>

SOUSA JÚNIOR, S. F. de; MENDES, T. A.; SIQUEIRA, E. Q. de. Development and calibration of a rainfall simulator for hydrological studies. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** [online], Porto Alegre – RS, v. 22, e59, 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170015>

SPOHR, R. B.; CORCINI, A. L. M.; PELLEGRIN, J.; BONFANTI, J. B.; DAL SOTO, M. F. e CARDOSO, T. Desenvolvimento e validação de um simulador de chuvas portátil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre – RS, v. 20, n. 2, p. 411-417, Abr./Jun. 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n2.p411-417>

TOSSELL, R.W.; DICKINSON, W.T.; RUDRA, R.P. and WALL, G.J. A PORTABLE RAINFALL SIMULATOR. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 29, n. 2, p. 155-162, 1987.

YU, W.; ZHAO, L.; FANG, Q.; HOU, R. Contributions of runoff from paved farm roads to soil erosion in karst uplands under simulated rainfall conditions. **Catena**, v. 196, 104887, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104887>

ZHAO, L.; HUANG, C.; WU, F. Effect of microrelief on water erosion and their changes during rainfall. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, n. 5, p. 579–586, 2015. <https://doi.org/10.1002/esp.3844>

CAPÍTULO 3 Características da chuva produzida por um simulador de chuvas portátil: efeito da regulagem e comparação com a chuva natural

RESUMO

O conhecimento das propriedades da chuva simulada é imprescindível para assegurar a utilização do simulador de chuvas nos estudos hidrológicos. Por isso, este estudo avaliou a chuva gerada com um simulador de chuvas com disco rotativo e comparou os resultados obtidos com os valores de referência para a chuva natural de mesma intensidade. Foram considerados diferentes pressões de operação, modelos de pulverizador e níveis de abertura do disco rotativo para obter a velocidade de impacto das gotas, energia cinética por unidade de tempo de chuva (EC_t), intensidade e a uniformidade da chuva simulada. A intensidade da chuva foi avaliada coletando água na área útil da parcela. Um sistema pluviométrico dinâmico foi usado para quantificar a velocidade das gotas e EC_t da chuva. Por fim, avaliou-se a uniformidade da chuva simulada por meio do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). Os resultados mostraram que é possível reproduzir uma amplitude de intensidades de chuva nos padrões desejados de homogeneidade de distribuição, considerando uma área de parcela de 0.56 m². A chuva simulada apresentou gotas com velocidades condizentes com os valores relatados para às gotas da chuva natural. Apesar disto, a EC_t da chuva simulada é menor do que a da chuva natural de mesma intensidade. A intensidade da chuva é influenciada pelos efeitos do bocal pulverizador, da pressão de operação e do nível de abertura do disco rotativo. A velocidade das gotas, a EC_t e o CUC da chuva simulada são influenciados pelos efeitos do bocal, em cada nível de pressão de operação e nível de abertura do disco rotativo. Com isso, verifica-se que os simuladores de chuvas devem ser aperfeiçoados de modo que a EC_t da chuva artificial, para uma dada chuva, seja semelhante a EC_t da chuva natural.

Palavras-chave: Intensidade da chuva, coeficiente de uniformidade de Christiansen, Velocidade das gotas, Energia cinética por unidade de tempo, Chuva natural.

ABSTRACT

Knowledge of properties of simulated rainfall is essential to ensure the use of rainfall simulator in hydrological studies. This study evaluated rainfall generated with a rainfall simulator with a rotating disk and compared the results obtained to reference values for natural rainfall of same intensity. Different operating pressures, sprayer nozzle models and rotating disc opening levels were considered to obtain the droplet velocity, time-specific kinetic energy of rainfall (KE_t), intensity and uniformity of the simulated rainfall. Intensity was evaluated by collecting water in the plot area. A dynamic gauge rainfall system was used to quantify droplet velocity and time-specific kinetic energy. Finally, Christiansen Uniformity Coefficient (CUC) for simulated rainfall was calculated. The results showed that it is possible to reproduce intensity of simulated rainfall in the desired patterns of distribution homogeneity, considering a plot area of 0.56 m². Drops of simulated rainfall have values of velocity consistent with values reported for drops of natural rainfall. Despite this, the KE_t values of simulated rainfall were lower than expected for natural rainfall of same intensity. The intensity of the simulated rainfall is influenced by spray nozzle, the operating pressure and opening level of rotating disc. Droplet velocity, KE_t and CUC of simulated rainfall are influenced by sprayer nozzle, at fluent operating pressure and rotating disk opening. Thus, it appears that rainfall simulators must be improved so that the KE_t of artificial rainfall, for a given rainfall, is similar to natural rainfall.

Keywords: Rainfall intensity, Uniformity coefficient, Droplet velocity, Time-specific kinetic energy.

1 INTRODUÇÃO

O uso de simulador de chuvas tem histórico bem estabelecido com variedade de aplicações em diferentes estudos hidrológicos (GREEN; PATTISON, 2022). Esses equipamentos são considerados uma ferramenta de pesquisa fundamental para a hidrologia, climatologia, geomorfologia e ciência do solo, quando se trata de investigar as características das chuvas e a resposta hidrológica do solo, principalmente durante a ocorrência de processo erosivo.

O conhecimento das propriedades da chuva gerada é imprescindível em experimentos com simuladores de chuvas, já que o principal objetivo de um simulador de chuva é reproduzir uma precipitação com características similares às de chuvas naturais. Alguns critérios básicos devem ser considerados para assegurar resultados sólidos, como exemplo: reproduzir várias intensidades de chuva, distribuição aleatória do diâmetro de gotas, velocidades de gotas realistas, chuvas espacialmente bem distribuídas e com energia cinética similar à de chuvas naturais (MENDES *et al.* 2021; NGASOH *et al.*, 2020; ZEMKE, 2017).

Sousa Junior *et al.* (2017) ressaltam que a incapacidade de simular totalmente as características físicas das gotas de chuva é uma limitação frequentemente relatada nos estudos com chuva simulada, assim, definir as aplicações em que o simulador de chuvas será utilizado é uma informação necessária. Em estudos sobre infiltração e escoamento superficial da água no solo não é necessário que a chuva simulada apresente exatamente as mesmas características da chuva natural, ou seja, as gotas produzidas pelo simulador de chuvas têm menor importância. Contudo, quando a ação da gota é crítica no processo a ser estudado, como na erosão por salpicamento ou infiltração em um solo exposto, se faz necessário simular com melhor precisão todas as características das tempestades naturais (SPOHR *et al.*, 2015).

Diversos projetos propuseram a construção de simuladores de chuvas de acordo com os objetivos específicos de cada pesquisa. Os equipamentos podem ser de grande escala (ISIDORO *et al.*, 2022) ou portáteis (ALVES SOBRINHO; GÓMEZ-MACPHERSON; GÓMEZ, 2008), pressurizados e não pressurizados (FAWZY *et al.*, 2020), totalmente automáticos (MACEDO *et al.*, 2021) e modelos híbridos, que também combinam a influência do vento com a chuva simulada (FISTER *et al.*, 2012).

No Brasil, o modelo InfiAsper (ALVES SOBRINHO; GÓMEZ-MACPHERSON; GÓMEZ, 2008) é uma versão do simulador de chuva pressurizado de pequena escala que utiliza um disco rotativo (MORIN *et al.*, 1967) com aberturas de padrão retangular que regula a intensidade da chuva por meio do controle do fluxo de água pulverizada nos bocais. Este

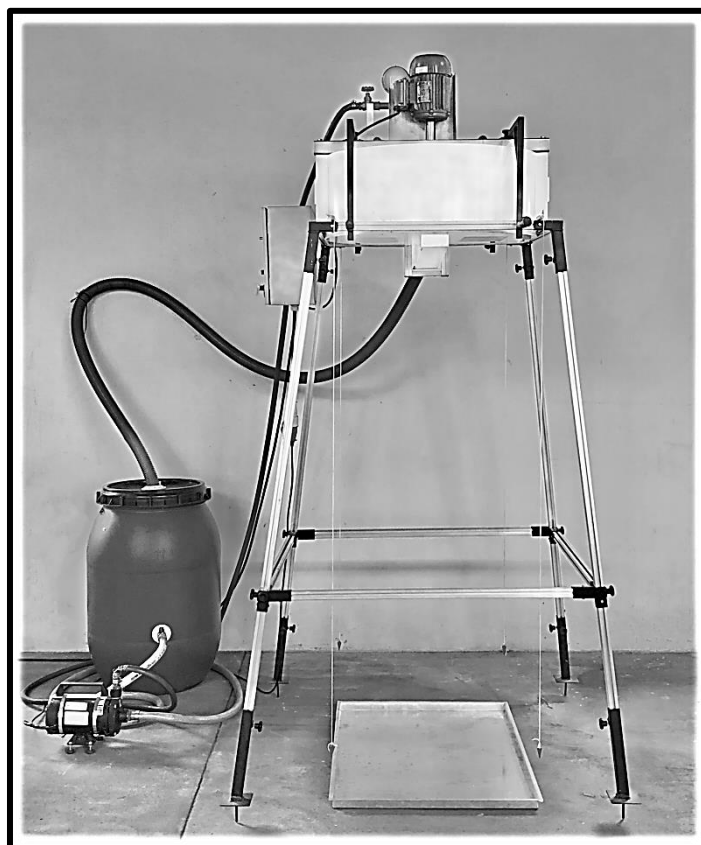
equipamento tem sido utilizado em estudos de erosão do solo e condições de uso e manejo do solo em diferentes regiões (PANACHUKI *et al.*, 2015; VALIM *et al.*, 2016; MORAES *et al.*, 2019; MARQUES *et al.*, 2019; ALMEIDA *et al.*, 2021; CARVALHO *et al.*, 2022). Simuladores de chuvas equipados com bocais de pulverização reproduzem ampla faixa de intensidade de precipitação e diâmetro da gota, permitindo a formação de um padrão de precipitação mais aleatório, semelhante ao da chuva natural (MACEDO *et al.*, 2021). As pesquisas com equipamentos de disco rotativo têm relatado os efeitos da abertura do disco rotativo, velocidade de rotação, pressão de operação e o tamanho da parcela experimental sobre às características da chuva artificial (MORIN *et al.*, 1967; PALL *et al.*, 1983; THOMAS; EL SWAIFY, 1989). No entanto, este conhecimento ainda é pouco abordado para o simulador de chuvas InfiAsper, levando em consideração uma abordagem conjunta do que pode causar alterações na chuva simulada.

Assim, os objetivos desta pesquisa foram: (i) caracterizar a velocidade de impacto das gotas, a energia cinética específica pelo tempo (EC_t), a intensidade e uniformidade espacial da chuva gerada por um simulador de chuvas portátil (similar ao modelo InfiAsper), (ii) Avaliar os efeitos de diferentes modelos de pulverizador, pressão de operação e níveis de abertura no disco rotativo nas características da chuva simulada e (iii) comparar a EC_t da chuva simulada com EC_t da chuva natural, considerando mesma intensidade da chuva.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Irrigação do Departamento de Recursos Hídricos (21°13'41.4" S de latitude, 44°59'28.6" W de longitude e 845 m de altitude) da Universidade Federal de Lavras, MG, Brasil. O simulador de chuvas utilizado neste estudo (Figura 1) é semelhante ao InfiAsper (ALVES SOBRINHO; GÓMEZ-MACPHERSON; GÓMEZ, 2008), sendo sua parcela retangular de área útil de 0.56 m² suficiente para se ter chuvas com coeficiente de uniformidade de Christiansen $\geq 80\%$. Mais detalhes podem ser encontrados no capítulo II.

Figure 1. Simulador de chuvas portátil



Fonte: Do autor (2022).

A chuva foi produzida por dois bocais pulverizadores fixos, posicionados a 2.30 m de altura da superfície do solo. Neste estudo, foram utilizadas duas unidades Veejet 80100 com diâmetro de abertura de 4.8 mm e duas unidades Veejet 80150 com diâmetro de abertura de 6.2 mm. Estes pulverizadores são de aço inoxidável e apresentam um largo padrão de pulverização de jato leque com um ângulo de pulverização nominal de aproximadamente 80°.

Antes do início de cada ensaio, foi feita a proteção da parcela experimental com um plástico e aplicação da chuva visando a calibração da intensidade chuva simulada. Após isto,

os ensaios de intensidade da chuva foram realizados considerando a relação entre o volume total de água coletado na parcela experimental e a tamanho da área útil da parcela (0.56 m²), obedecendo o tempo de ensaio de 5 minutos.

A avaliação da uniformidade da chuva foi realizada por meio do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942), que pode ser obtido com a Equação 1. Os ensaios foram realizados durante 10 minutos e a lâmina precipitada foi obtida por meio da pesagem da massa da água coletada em 16 coletores de 50.26 cm² de área de coleta, espaçamentos de 0,20 m e 0,17 m (4x4 em malha) na parcela experimental. Para transformar massa no volume, considerou-se a densidade da água de 1,0 g/cm³.

(1)

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

Onde: CUC = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (%); X_i = lâmina precipitada em cada coletor (mm); \bar{X} = lâmina média precipitada (mm); n = número de coletores.

Na sequência foi realizada a avaliação da velocidade de impacto e EC_t das gotas da chuva simulada. Para isto, foi utilizado o sistema dinâmico de pluviometria – UFLA-DRGS – (COLARES *et al.*, 2016), em ensaios com duração de 10 minutos. O equipamento UFLA/DRGS foi posicionado no centro da parcela experimental e sua velocidade de rotação foi verificada em 120 rpm com um tacômetro. Este sistema apresenta 29 pluviômetros distribuídos ao longo de uma barra plana (Figura 2A) com um pluviômetro circular posicionado no centro e 14 pluviômetros quadrados de mesma dimensão em ambos os lados, esquerdo e direito, movimentando-se em diferentes velocidades escalares (Figura 2B). Os pluviômetros quadrados apresentam a parte superior cortada em um ângulo de 45° graus, que permite relacionar a velocidade vertical da gota (V_v) com a velocidade horizontal do pluviômetro (V_h), conforme proposto por Colares et al. (2016) na Equação 3.

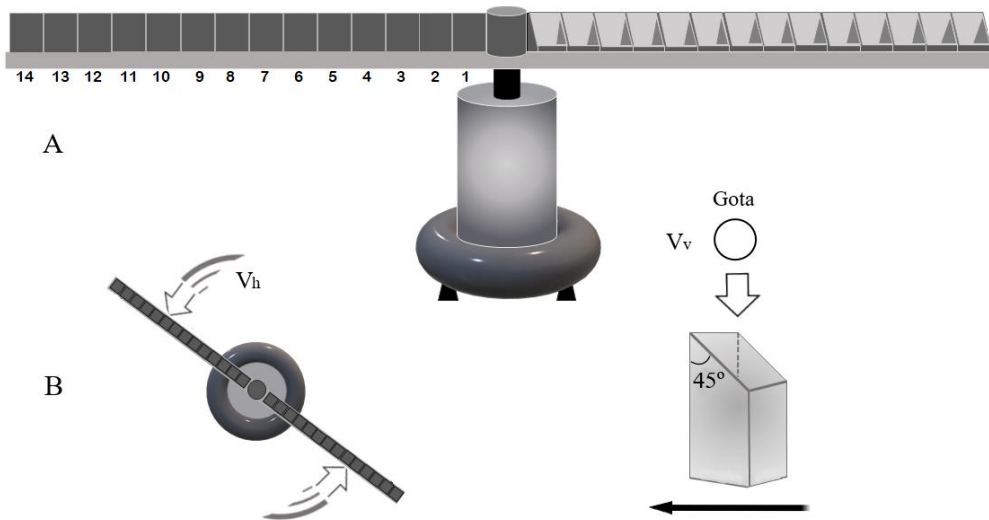
Durante o ensaio, os pluviômetros são preenchidos por gotas de chuva de acordo com sua posição radial, portanto, cada pluviômetro terá uma velocidade horizontal única, calculada pela Equação 2.

(2)

$$v_{hi} = 2\pi R r_i$$

Onde: v_{hi} = velocidade horizontal ($m \cdot s^{-1}$); R = rotações por segundo; r_i = distância do centro do pluviômetro “i” até o centro da barra de sustentação (m); i = posição do pluviômetro.

Figure 2. Esquema do Sistema dinâmico de pluviometria (UFLA/DRGS).



Legenda: A) o sistema tem 29 pluviômetros ao longo de uma barra plana e B) pluviômetros cortados com um ângulo de 45° movimentando-se em diferentes velocidades permitem relacionar sua velocidade horizontal (V_h) à velocidade vertical da gota (V_v) usando as Equações 2-3.

Fonte: Do autor (2022).

A velocidade vertical da gota que pode entrar em um determinado pluviômetro pode ser obtida em função de v_{hi} por meio da Equação 3. A partir dos dados coletados, um histograma de frequência acumulada pode ser elaborado, o que possibilita a obtenção da frequência relativa de ocorrência de gotas com diferentes velocidades.

(3)

$$v_{vi} = \sqrt{2} \cdot v_{hi}$$

Onde: v_{vi} = velocidade vertical em cada posição radial, i ($m \cdot s^{-1}$).

A energia cinética, por unidade de massa, da chuva (EC) sobre a superfície do solo depende da velocidade de impacto das gotas e pode ser determinada pela Equação 4. A energia cinética da chuva específica pelo tempo (EC_t), pode ser calculada com a Equação 5.

(4)

$$EC = \frac{MV^2}{2}$$

Onde: EC = energia cinética (J); m = massa da gota de água (kg); V = velocidade de impacto da gota ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

(5)

$$EC_t = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(M_{i-1} - M_i)v_{vi}^2}{A_i t}$$

Onde: EC_t = energia cinética específica pelo tempo ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); m = massa de água coletada durante o ensaio (kg); A_i = área total do pluviômetro (m^2); t = tempo de duração da chuva (h).

Foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado (DIC) 4×3 , com três repetições. Os ensaios permitiram avaliar o simulador de chuvas operando com dois modelos de bocais VeeJet (80100 e 80150), sob dois níveis de pressões (41 e 48 kPa) e dois níveis de aberturas do disco rotativo (100 e 50% de abertura). Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) realizada por meio do teste F. Em caso de fonte de variação significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. As análises foram elaboradas com o software estatístico Sisvar 5.6 (FERREIRA, 2019).

A avaliação da qualidade da chuva simulada foi realizada utilizando os resultados obtidos de EC_t comparados às características da chuva natural relatadas em estudos empíricos. A energia cinética da gota de chuva é um indicador fundamental do potencial erosivo da chuva e pode ser estimada como uma expressão fatorial em função da intensidade de chuva (SERIO *et al.*, 2019). Van Dijk *et al.* (2002) revisaram diversos estudos sobre a relação entre intensidade de chuva e energia cinética (LAWS e PARSONS, 1943; MARSHALL e PALMER, 1948; CARTER *et al.*, 1974; KINEELL, 1980; BOLLINE *et al.*, 1984; ROSEWELL, 1986; BROWN e FOSTER, 1987; BRANDT *et al.*, 1988; MCISAAC, 1990; COUTINHO e TOMÁS, 1995; JAYAWARDENA e REZAUR, 2000) e propuseram uma equação exponencial para uma estimativa (Equação 6). Neste estudo, foi utilizado uma relação entre os valores de energia cinética unitária (EC_u), 1 mm de chuva, obtidos com a equação elaborada por Van Dijk *et al.* (2002), e a intensidade da chuva para obter a EC_t da chuva natural (Equação 7).

(6)

$$EC_u = 28.3 \cdot [1 - 0.52 \cdot e^{-0.042 \cdot (I)}]$$

Onde: EC_u = energia cinética unitária ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$); I = intensidade da chuva ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$).

(7)

$$EC_t = EC_u \cdot I$$

Para a avaliação da EC_t da chuva simulada com relação a EC_t da chuva natural, foram utilizadas estatísticas e indicadores, sendo: média, desvio padrão (σ), coeficiente de variação (cv), valores máximos e mínimos, erro absoluto médio (EAM) – Equação 8; raiz quadrada do erro quadrado médio (REQM) – Equação 9; coeficiente de correlação (r) – Equação 10; índice de concordância (d) – Equação 11 (WILLMOTT, 1982) e índice de confiança (C) – Equação 12 (CAMARGO E SENTELHAS, 1997).

(8)

$$EAM = N_d^{-1} \sum_{i=1}^{N_d} |P_i - O_i|$$

(9)

$$REQM = \left[N_d^{-1} \sum_{i=1}^{N_d} (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5}$$

(10)

$$r = \frac{\sum (P_i - \bar{P})x(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum (P_i - \bar{P})^2 x \sum (O_i - \bar{O})^2}}$$

(11)

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

(12)

$$C = d \times r$$

Onde: N_d = número de pares de dados; P_i = valor de EC_{tempo} da chuva simulada ($J \cdot m^2 \cdot h^{-1}$); O_i = valor de EC_{tempo} da chuva simulada ($J \cdot m^2 \cdot h^{-1}$); EAM = Erro absoluto médio ($J \cdot m^2 \cdot h^{-1}$); REQM = Raiz do erro quadrático médio ($J \cdot m^2 \cdot h^{-1}$); \bar{O} = média dos valores O_i ($J \cdot m^2 \cdot h^{-1}$) e \bar{P} = média dos valores P_i ($J \cdot m^2 \cdot h^{-1}$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de variância (ANOVA)

O resumo da ANOVA das variáveis intensidade de chuva (I), coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), velocidade de impacto das gotas (V) e energia cinética pelo tempo (EC_t) que caracterizaram a chuva simulada, considerando dois modelos de pulverizadores Veejet (80100 e 80150), duas pressões de operação (41 e 48 kPa) e 50 e 100% de aberturas no disco rotativo (DR) do simulador de chuvas, está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo da ANOVA das características da chuva simulada.

Fonte de variação	GL	Teste F			
		I	CUC	V	EC_t
Bocal (B)	1	17041,65**	28,46**	397,45**	741,83**
Pressão (P)	1	1380,76**	0,15 ^{NS}	9,32**	17,18**
Disco rotativo (DR)	1	92338,52**	16,44**	11,64**	2168,27**
B x P	1	5,68*	1,75 ^{NS}	0,81 ^{NS}	1,84 ^{NS}
B x DR	1	1228,41**	12,55**	0,03 ^{NS}	45,07**
P x DR	1	183,83**	3,06 ^{NS}	2,61 ^{NS}	1,28 ^{NS}
B x P x DR	1	2,32 ^{NS}	12,55**	0,29 ^{NS}	5,52*
Erro	16				
Total	23				
CV (%)		0,56	0,58	3,01	3,34
Média Geral		93,82	83,01	3,78	1226,22

Em que: GL – graus de liberdade, * – significativo a 5% de probabilidade, ** - significativo a 1% de probabilidade, NS – não-significativo, CV – coeficiente de variação, I - intensidade de chuva ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), CUC – coeficiente de uniformidade de Christiansen (%), V – velocidade de impacto das gotas ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), EC_t – energia cinética específica pelo tempo ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$).

A ANOVA evidenciou que os modelos de bocais, a pressão de operação e o nível de abertura do DR causaram efeitos significativos nas características da chuva simulada, incluindo as interações entre essas fontes de variação (Tabela 1). Assim, os efeitos das interações duplas entre o bocal, a pressão de operação e a abertura do DR sobre a intensidade da chuva simulada em cada ensaio, podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação da Intensidade da chuva ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) simulada considerando diferentes bocais, aberturas do DR e pressões de operação.

Bocal (Veejet)	Pressão (kPa)	
	41	48
	80100	75,68 bB
80150	104,03 bA	111,45 aA

(continua)

Tabela 2. Comparação da Intensidade da chuva ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) simulada considerando diferentes bocais, aberturas do DR e pressões de operação.

(conclusão)

DR (%)	Bocal (Veejet)	
	80100	80150
50	51,23 bB	71,60 aB
100	108,57 bA	143,88 aA

Pressão (kPa)	DR (%)	
	50	100
41	58,90 bB	120,82 aB
48	63,93 bA	131,63 aA

Em que: Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha, ou mesma letra maiúscula na coluna, para cada uma das combinações das fontes de variação não diferem a 5% de probabilidade entre si, pelo teste de Scott-Knott.

As menores médias de intensidade da chuva foram obtidas nos ensaios com o bocal Veejet 80100, sob o nível de 50% de abertura do DR e pressão de operação de 41 kPa. O oposto foi observado nos ensaios com o bocal Veejet 80150, sob nível de abertura de 100% do DR e pressão de operação de 48 kPa. Observou-se, também, que o disco rotativo exerce maior influência sobre intensidade da chuva. Esses resultados ocorrem devido às características estruturais do simulador de chuva avaliado com diferentes bocais pulverizadores e níveis de abertura do disco rotativo, que possibilitam o controle da intensidade de água aplicada pelo equipamento. Isto é corroborado com a literatura (MORIN *et al.*, 1967; PALL *et al.*, 1983; THOMAS; EL SWAIFY, 1989) e esses fatores permitem regular a intensidade da chuva em simuladores de chuva que apresentem essas características, como no presente estudo.

Os efeitos simples do bocal pulverizador, da pressão de operação e da abertura do DR na velocidade de impacto das gotas da chuva simulada são apresentados no Tabela 3.

Tabela 3. Velocidade das gotas da chuva (V) considerando diferentes bocais Veejet, aberturas do DR e pressão de operação.

(continua)

Bocal (Veejet)	V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
80100	3,32 B
80150	4,23 A

DR (%)	V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
50 %	3,70 B
100 %	3,85 A

Pressão (kPa)	V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
41	3,71 B

Tabela 3. Velocidades das gotas da chuva (V) considerando diferentes bocais Veejet, aberturas do DR e pressão de operação.

(conclusão)

Pressão (kPa)	V (m·s ⁻¹)
48	3,85 A

Em que: Médias seguidas de mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

É possível observar que as médias de velocidade variaram significativamente considerando o efeito simples de todas as fontes de variação avaliadas. Os bocais Veejet, 80100 e 80150, podem simular chuvas com velocidades médias das gotas de 3,32 e 4,23 m·s⁻¹, respectivamente. Considerando a velocidade das gotas, os bocais obtiveram maior influência em comparação com a pressão e o DR. Contudo, todos os resultados estão de acordo com a faixa de velocidades terminais comumente relatadas para chuvas naturais, ou seja, valores entre 1,8 a 9,17 m·s⁻¹ para gotas com diâmetro de 0,5 a 5,6 mm (JOHANNSEN *et al.*, 2020; GUNN, KINZER, 1949). Kavian *et al.* (2018) mediram o tamanho de gotas e calcularam suas respectivas velocidades usando técnica de imagem de alta velocidade em um simulador de chuvas montado com bocais Veejet 80100 operando sob pressão de 60 kPa. Esses autores registraram gotas com diâmetro de 0,43 e 4,56 mm com velocidades variando de 1,12 a 6,68 m·s⁻¹, o que corrobora com os resultados registrados no presente estudo.

Na Tabela 1, não foram identificadas diferenças significativas na interação tripla, entre médias, para a variável resposta velocidade das gotas pelo teste F. No entanto, na análise de variância dos desdobramentos, ao usar o teste de Scott-Knott ao nível de significância de 5% (Tabela 4), foram identificados efeitos significativos para o desdobramento da fonte de variação Bocal, dentro de cada combinação de pressão e abertura do DR, para todas as combinações, e para combinações pontuais no desdobramento da fonte de variação Pressão, dentro de cada combinação de Bocal e DR e, também, no desdobramento da fonte de variação DR, dentro de cada combinação de Bocal e Pressão.

Tabela 4. Análise comparativa entre médias de velocidade (m·s⁻¹) considerando os bocais Veejet em combinação com aberturas do DR e pressões de operação.

(continua)

Bocal(Veejet)	Pressão (kPa)	
	41	48

Tabela 4. Análise comparativa entre médias de velocidades ($m \cdot s^{-1}$) considerando os bocais Veejet em combinação com aberturas de DR e pressões de operação.

(conclusão)

Bocal(Veejet)	Pressão (kPa)			
	41		48	
	RD (%)			
	50	100	50	100
80100	3,23 Bba	3,50 Baa	3,23 Baa	3,30 Bab
80150	4,23 Aba	4,43 Aaa	4,10 Aaa	4,20 Aab

Em que: Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, minúsculas dentro dos níveis do fator DR e minúsculas em itálico dentro dos níveis do fator Pressão não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

Com relação ao desdobramento da fonte de variação bocal para combinações de DR e pressão, considerando a pressão de 41 kPa, observa-se menores médias de velocidade na abertura de 50% e, esses resultados diferem significativamente dos registrados na abertura de 100%. Por outro lado, considerando a pressão de 48 kPa, as médias de velocidade de gotas são estatisticamente iguais em 50 e 100% de abertura do DR. As médias de velocidade das gotas não foram afetadas significativamente no desdobramento da fonte de variação pressão para combinações de bocal e DR, considerando 50% de abertura. No entanto, considerando a abertura de 100% o efeito foi significativo, onde se observou médias menores na pressão de operação de 48 kPa. Este resultado é ocasionado pelo fracionamento das gotas com a pulverização realizada em maior pressão de operação. O tamanho das gotas produzidas em um simulador de chuvas pressurizado é inversamente proporcional à pressão de operação (SOUSA JUNIOR *et al.*, 2017), o que pode influenciar na velocidade das gotas da chuva. Por fim, com relação ao efeito do desdobramento da fonte de variação DR para combinações de bocal e pressão, os resultados diferem significativamente, considerando a pressão de 41 kPa, e são estatisticamente iguais na pressão de 48 kPa.

A velocidade das gotas, frequentemente, é uma limitação de simuladores de chuvas portáteis como relatado nos estudos de Cerdà *et al.* (1997) e Wacha *et al.* (2021), devido ao curto espaço entre o posicionamento dos bocais pulverizadores e a superfície do solo impossibilita que as gotas da chuva simulada alcancem velocidades de impacto similares às velocidades terminais chuvas naturais.

O efeito de cada tipo de bocal sobre o coeficiente de uniformidade de Christiansen da chuva simulada, considerando níveis de abertura do DR e pressão de operação, são apresentados nas Tabelas 5.

Tabela 5. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC %) considerando diferentes bocais Veejet, aberturas do DR e pressões de operação.

Bocal (Veejet)	Pressão (kPa)			
	41		48	
	RD (%)			
	50	100	50	100
80100	82,97 Baa	81,83 Bba	83,50 Aaa	81,67 Bba
80150	84,27 Aaa	83,13 Aba	82,90 Abb	83,83 Aaa

Em que: Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, minúsculas dentro dos níveis do fator DR e minúsculas em itálico dentro dos níveis do fator Pressão não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

Em geral, o efeito do desdobramento da pressão de operação para combinações bocal e DR não foram significativos sobre a uniformidade da chuva, exceto na combinação bocal Veejet 80150 e abertura de 50%, onde o efeito foi significativo. Os melhores resultados de uniformidade da chuva foram obtidos com o bocal Veejet 80150, considerando 50 e 100% de abertura do DR na pressão de 41 kPa e 100% na abertura do DR no caso da pressão de 48 kPa. Ressalta-se que chuvas simuladas bem distribuídas são essenciais para experimentos com simuladores de chuvas e na literatura os valores de CUC superiores a 80% são considerados adequados (ISERLOH *et al.*, 2013; SPORH *et al.* 2015). Sendo assim, pode-se destacar a boa uniformidade da chuva simulada neste estudo, ou seja, todos os valores do CUC obtidos nos ensaios de uniformidade representam boa distribuição da chuva, sendo 83% a média geral.

Um estudo de Macedo *et al.* (2021), os maiores valores de uniformidade da chuva, obtidos em simulador semelhante ao deste estudo, foram associados às maiores intensidades de chuva e os resultados também não se relacionaram à pressão de operação. Porém, no estudo de Sousa Júnior *et al.* (2017), um modelo diferente de simulador de chuvas, sem disco rotativo, gerou resultados de CUC que não foram influenciados pela variação na intensidade da chuva. Esses resultados publicados na literatura e os apresentados neste estudo indicam que chuvas simuladas mais intensas podem proporcionar melhor uniformidade em simuladores de chuva projetados com disco rotativo.

O efeito do tipo de bocal sobre a EC_t , considerando cada nível de abertura do DR e pressão de operação, são apresentados nas Tabela 6. Resultados semelhantes ao relatado sobre a uniformidade foram observados nos resultados da EC_t da chuva simulada, ou seja, médias de EC_t diferem significativamente com relação às influências dos bocais e aberturas do DR. No geral, não se observou diferenças significativas nas médias de EC_t com relação à pressão de operação, com exceção do resultado obtido no bocal 80100 considerando 100% de abertura no

DR. Os maiores resultados de EC_t se relacionaram com as maiores velocidades de impacto das gotas e alta intensidade da chuva.

Tabela 6. Análise da EC_t ($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) considerando diferentes bocais Veejet, aberturas do DR e pressões de operação.

Bocal (Veejet)	Pressão (kPa)			
	41		48	
	DR (%)			
	50	100	50	100
80100	648,23 Bba	1256,57 Bab	682,03 Bba	1406,87 Baa
80150	974,93 Aba	1886,47 Aaa	1041,90 Aba	1912,73 Aaa

Em que: Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, minúsculas dentro dos níveis do fator DR e minúsculas em itálico dentro dos níveis do fator Pressão não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

A comparação dos resultados de EC_t da chuva artificial com valores estimados para a chuva natural de mesma intensidade, é apresentada na tabela 7. Pode ser observado que a média de EC_t da chuva simulada é aproximadamente metade da EC_t da chuva natural quando considerado a mesma intensidade da chuva. Foi obtido um coeficiente de correlação, r , de 0,47 e o p-valor da correlação foi igual a zero, portanto, sendo significativa a correlação positiva a um nível de significância de 1%. O erro absoluto médio, EAM, e a raiz do erro quadrático médio apresentaram valores elevados, sendo 1388,27 e 1510,18, respectivamente. Esses resultados podem evidenciar um desempenho ruim do simulador de chuvas em simular adequadamente a chuva natural.

Tabela 7. Índices estatísticos para a relação entre as chuvas artificial e natural.

	<i>(continua)</i>	
	EC_t chuva artificial	EC_t chuva natural
Média	1226.22	2614,49
Σ	467.71	1064,49
cv	0.38	0,41
Máximo	2017.57	4222,74
Mínimo	641.40	1260,99
r		0,47
p-valor		0,00

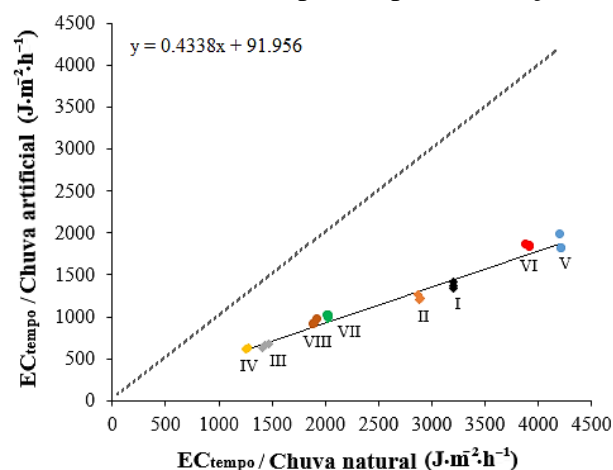
Tabela 7. Índices estatísticos para a relação entre as chuvas artificial e natural.

	(conclusão)
EAM	1388,27
REQM	1510,18
d	0,60
C	0,28

N = 24 pares de dados; Média, Máximo e Mínimo em $J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$; - desvio padrão ($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); cv – coeficiente de variação; r – coeficiente de correlação; EAM – erro médio absoluto ($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); REQM – raiz quadrada do erro quadrado médio ($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); d – índice de concordância; C – índice de confiança.

A correlação linear comparando a chuva simulada com a chuva natural de mesma intensidade é apresentada na Figura 3. Assim, verifica-se, que a linha de regressão linear entre a chuva natural e a chuva simulada no simulador, se encontra totalmente abaixo da reta 1:1, demonstrando assim, um fraco desempenho (principalmente em altas intensidades) do simulador de chuvas em reproduzir o parâmetro EC_t semelhante à eventos naturais de chuva. Em geral, o valor médio de EC_t da chuva simulada representou 48% ($\pm 3.26\%$) da EC_t de uma chuva natural com mesma intensidade. Considerando a mesma relação, este resultado é superior ao desempenho de 17.6% obtido pelo simulador de chuvas descrito por Zemke (2017) e também supera outros onze simuladores de chuva avaliados por Iserloh *et al.* (2013), cujo os resultados variaram entre 2 e 47%.

Figure 3. Chuva simulada comparada por correlação à chuva natural.



Legenda: Letras romanas representam os tratamentos: I – Veejet 80100 / 48 kPa / 100%; II – Veejet 80100 / 41 kPa / 100%; III – Veejet 80100 / 48 kPa / 50%; IV – Veejet 80100 / 41 kPa / 50%; V – Veejet 80150 / 48 kPa / 100%; VI – Veejet 80150 / 41 kPa / 100%; VII – Veejet 80150 / 48 kPa / 50%; VIII – Veejet 80150 / 41 kPa / 50%.

Fonte: Do autor (2022).

Avaliando a concordância entre os dados os dados comparados, verificou-se um índice d de 0.60 (Tabela 7). Com isso, o índice de confiança (C), que evidencia o desempenho, foi de 0.28, o que classifica a chuva simulada como “péssima”, conforme critério proposto por Camargo e Sentelhas (1997). Assim, o simulador de chuva não mostra desempenho satisfatório para reproduzir a EC_t semelhante aos eventos de chuva natural, e isto pode estar relacionado com a baixa velocidade e o fracionamento das gotas no momento da pulverização, somados a pouca distância (2.30 m) de deslocamento até o impacto com o solo. Estes resultados destacam também que bocais VeeJet, comumente usados em simuladores de chuvas, não reproduzem o tamanho e a distribuição de velocidade das gotas de maneira semelhante às gotas observadas em chuvas naturais, sobretudo em altas intensidades (ISERLOH *et al.*, 2012; PETRŮ, KALIBOVÁ, 2018; WACHA *et al.*, 2021). A elevação do fracionamento das gotas com o aumento da pressão de operação no simulador de chuvas e a pouca distância de deslocamento até o impacto com o solo são grandes desafios que limitam os resultados da simulação de chuva em equipamentos portáteis, que utilizam pontas de pulverização como mecanismo gerador de chuva.

4 CONCLUSÃO

Nesse estudo, foi apresentada a avaliação de uma variação do simulador de chuvas portátil com disco rotativo. Os resultados mostraram que intensidade da chuva simulada é influenciada pelos efeitos do bocal, da pressão de operação, do nível de abertura do DR e a interação entre essas fontes de variação. Por outro lado, a velocidade de impacto das gotas, a EC_t e o CUC foram influenciados pelo efeito do tipo de bocal, combinado com os níveis de pressão de operação e abertura do DR.

O simulador de chuvas possibilitou reproduzir diversas intensidades de chuva nos padrões desejados de homogeneidade de distribuição, ou seja, $CUC \geq 80\%$. Nesta pesquisa, as maiores intensidades de chuva simulada proporcionaram os melhores índices de uniformidade e as chuvas simuladas apresentaram gotas com velocidades de impacto, que são possíveis de ocorrer em chuvas naturais.

Apesar das velocidades das gotas estarem de acordo com a faixa de velocidades terminais de gotas relatadas para chuvas naturais (1,8 a 9,17 $m \cdot s^{-1}$), a EC_t da chuva simulada é aproximadamente metade quando comparada a EC_t da chuva natural, considerando a mesma intensidade da chuva simulada. Este resultado pode estar relacionado com o fracionamento das gotas no momento de pulverização, o que se mostrou um grande desafio. Também a altura de queda das gotas do simulador (2.30 m) é insuficiente pois são necessários cerca de 10 metros para que a gota possa alcançar sua velocidade terminal. Esses detalhes provocam influência nas características da chuva simulada nos equipamentos pressurizados e expõem a necessidade de melhorias no processo de simulação de chuva.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, W. S.; STEFFEN, S.; OLIVEIRA, L.F.C. de; CARVALHO, D.F. Duration and intensity of rainfall events with the same erosivity change sediment yield and runoff rates. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 9, n. 1, p. 69-75, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.10.004>
- ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H. e GÓMEZ, J. A. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 2, p. 163-170, Jun. 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00150.x>
- BOLLINNE, A.; FLORINS, P.; HECQ, P; HOMERIN, D.; RENARD, V. WOLF, J.L. Etude de l'énergie des pluies en climat tempéré océanique d'Europe Atlantique. **Zeitschrift für Geomorphologie**. Supplement band, n. 49, p. 27-35, 1984.
- BRANDT, J. The transformation of rainfall energy by a tropical rain forest canopy in relation to soil erosion. **Journal of Biogeography**, v. 15, n. 1, p. 41-48, Jan. 1988. <https://doi.org/10.2307/2845044>
- BROWN, L.C.; FOSTER, G. R. Storm erosivity using idealized intensity distributions. **Transactions of the ASAE**, V. 30, n. 2, p. 379-386, 1987. <https://doi.org/10.13031/2013.31957>
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p.89-97, 1997. [http://www.leb.esalq.up.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1997/1997_RB_Agro_5\(1\)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf](http://www.leb.esalq.up.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1997/1997_RB_Agro_5(1)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf)
- CARTER, C.E.; GREER, J.D.; BRAUD, H.J.; FLOYD, J.M. Raindrop characteristic in South Central United States. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 6, p. 1033-1037, 1974. <https://doi.org/10.13031/2013.37021>
- CARVALHO, D. F.; MACEDO, P. M. S.; PINTO, M. F.; ALMEIDA, W. S.; SCHULTZ, N. Soil loss and runoff obtained with customized precipitation patterns simulated by InfiAsper. **International Soil and Water Conservation Research**, In Press, 11 Feb. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.12.003>
- CERDÀ, A., IBÁÑEZ, S., & CALVO, A. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. **Soil Technology**, v. 11, n. 2, p. 163-170, 1997. [http://doi.org/10.1016/S0933-3630\(96\)00135-3](http://doi.org/10.1016/S0933-3630(96)00135-3)
- CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942. 124p. Bulletin 670.

COLARES, M.D.F.B.; LIMA, L.A.; LIMA, P.L.T.; LEMOS, L. T. O.; RIKEN, N., & VERDOODT, A. Velocity of simulated raindrops in a wind tunnel measured by different technologies. *In: 10th International Symposium on Agriculture and the Environment*, 2016, Purdue University. **Anais**. Indiana: Purdue University, May 23-27, 2016.

COUTINHO, M. A.; TOMÁS, P. P. Characterization of raindrop size distributions at the Vale Formoso Experimental Erosion Center. **Catena**, v. 25, n. 1-4, p. 187-197, Jun. 1995. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00009-H](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00009-H)

FERREIRA, D. F. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS. **REVISTA BRASILEIRA DE BIOMETRIA**, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, Dec. 2019. DOI: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.

FAWZY, H. E. D.; BASHA, A. M.; BOTROSS, M. N. Estimating a mathematical formula of soil erosion under the effect of rainfall simulation by digital close range photogrammetry technique. **Alexandria Engineering Journal**, v. 59, N. 6, p. 5079-5097, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.09.039>

FISTER, W.; ISERLOH, T.; RIES, J. B. & SCHIMIDT, R.-G. A portable wind and rainfall simulator for in situ soil erosion measurements. **CATENA**, v. 91, p. 72-84, Apr. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.03.002>

GREEN, D.; PATTISON, I. Christiansen uniformity revisited: Re-thinking uniformity assessment in rainfall simulator studies. **Catena**, v. 217, 106424, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106424>

GUNN, R. & KINZER, G. D. THE TERMINAL VELOCITY OF FALL FOR WATER DROPLETS IN STAGNANT AIR. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 6, n. 4, p. 243-248, Aug. 1949. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1949\)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2)

ISERLOH, T.; RIES, J. B.; ARNÁEZ, J.; BOIX-FAYOS, C.; BUTZEN, V.; CERDÀ, A.; ECHEVERRÍA, M. T.; FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J.; FISTER, W.; GEIBLER, C.; GÓMEZ, J. A.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; KUHN, N.; LÁZARO, R.; LEÓN, F. J.; MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; MARZEN, M.; WIRTZ, S. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. **Catena**, v. 110, p. 100-112, Nov. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013>

ISIDORO, J. M. G. P.; SILVEIRA, A. AND LIMA, B. O. Development of a large-scale rainfall simulator for urban hydrology research. **Engenharia Sanitaria e Ambiental** [online]. v. 27, n. 1, pp. 169-173, Jan./Feb. 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200365>

JAYAWARDENA, A.W.; REZAUR, R.B. Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hon Kong. **Hydrological Processes**, v. 14, n. 6, p. 1069-1082, 2000. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(20000430\)14:6<1069::AID-HYP997>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(20000430)14:6<1069::AID-HYP997>3.0.CO;2-Q)

KINEELL, P.I.A. Rainfall intensity-kinetic energy relationships for soil loss prediction. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 1, p. 153-155, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500010033x>

LAWS, J. O.; PARSONS, D. A. The relation of raindrop size to intensity. **Transactions American Geophysical Union**, v. 24, n. 2, p. 452-460, Oct./Nov. 1943. <https://doi.org/10.1029/TR024i002p00452>

MACEDO, P. M. S.; PINTO, M. F.; ALVES SOBRINHO, T.; SCHULTZ, N.; COUTINHO, T.A.R. & CARVALHO, D.F. de. A modified portable rainfall simulator for soil erosion assessment under different rainfall patterns. **Journal of Hydrology**, 596, 126052, May. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126052>

MARQUES, V.S.; CEDDIA, M.B.; ANTUNES, M.A.H.; CARVALHO, D.F.; ANACHE, J.A.A.; RODRIGUES, D.B.B.; OLIVEIRA, P.T.S. USLE K-Factor Method Selection for a Tropical Catchment. **Sustainability**, v. 7, n. 11, 1840, Mar. 2019. <https://doi.org/10.3390/su11071840>

MARSHALL, J.; PALMER, W. M. The distribution of raindrops with size. **Journal of Meteorology**, v. 5, p. 165-166, Aug. 1948. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2)

MCISAAC, G.F. Apparent geographic and atmospheric influences on raindrop sizes and rainfall kinetic energy. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 45, n. 6, p. 663-666, Nov. 1990.

MENDES, T. A.; PEREIRA, S. A. dos S.; REBOLLEDO, J. F. R.; GITIRANA JR, G. de F. N.; MELO, M. T. da S.; LUZ, M. P. da. Development of a Rainfall and Runoff Simulator for Performing Hydrological and Geotechnical Tests. **Sustainability**, v. 13, n. 6, 3060, Mar. 2021. <https://doi.org/10.3390/su13063060>

MEYER, L. D. & HARMON, W. C. Multiple-Intensity Rainfall Simulator for Erosion Research on Row Sideslopes. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 22 n. 1, p. 100-103, 1979. <https://doi.org/10.13031/2013.34973>

MORAES, A. G. L.; CARVALHO, D. F. de; ANTUNES, M. A. H.; CEDDIA, M. B. & FLANAGAN, D. C. Steady infiltration rate spatial modeling from remote sensing

data and terrain attributes in Southeast Brazil. **Geoderma Regional**, v. 20, e00242, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00242>

MORIN, J.; GOLDBERG, D.; SEGNER, I. A rainfall simulator with a rotating disk. **Transacions of the ASAE**, St. Joseph, v.10, n.1, p.74-77, 1967. <https://doi.org/10.13031/2013.39599>

NGASOH, F. G.; MBAJIORGU, C. C.; KAMAI, M. B. AND OKORO, G. O. A Revisit of Rainfall Simulator as a Potential Tool for Hydrological Research. **Agrometeorology**, Ram Swaroop Meena, IntechOpen, Nov. 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93532>.

PANACHUKI, E.; SANTOS, M. A. N.; PAVEI, D. S.; ALVES SOBRINHO, T.; CAMACHO, M. A.; MONTANARI, R. Soil and water loss in Ultisol of the Cerrado-Pantanal Ecotone under different management systems. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n.9, p.926-932, Mar. 2015. <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.8908>

PETRÚ, J.; KALIBOVÁ, J. Measurement and computation of kinetic energy of simulated rainfall in comparison with natural rainfall. **Soil & Water Res.**, v. 13, n.4, p.226-233, Jul. 2018. <https://doi.org/10.17221/218/2016-SWR>

PALL, R.; DICKINSON, W. T.; BEALS, D. e MCGIRR, R. DEVELOPMENT AND CALIBRATION OF A RAINFALL SIMULATOR. **Canadian Agricultural Engineering**. v. 25, n. 2, p.181-187, 1983.

RIES, J. B.; SEEGER, M.; ISERLOH, T.; WISTORF, S. FISTER, W. Calibration of simulated rainfall characteristics for the study of soil erosion on agricultural land. **Soil & Tillage Research**, 106, p.109-116, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.07.005>

ROSEWELL, C.J. Rainfall kinetic energy in Eastern Australia. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 25, n. 11, p. 1695-1701, 1986. <https://www.jstor.org/stable/26183494>

SALLES, C.; POESEN, J.; & SEMPERE-TORRES, D. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. *Journal of Hydrology*, v. 257, n. 1-4), p. 256-270, Feb. 2002. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00555-8](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00555-8)

SERIO, M. A., CAROLLO, F. G., & FERRO, V. A method for evaluating rainfall kinetic power by a characteristic drop diameter. **Journal of Hydrology**, v. 577, 123996, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123996>

SOUSA JÚNIOR, S. F. de; MENDES, T. A.; SIQUEIRA, E. Q. de. Development and calibration of a rainfall simulator for hydrological studies. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** [online], Porto Alegre – RS, v. 22, e59, 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170015>

SPOHR, R. B.; CORCINI, A. L. M.; PELLEGRIN, J.; BONFANTI, J. B.; DAL SOTO, M. F. e CARDOSO, T. Desenvolvimento e validação de um simulador de chuvas portátil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre – RS, v. 20, n. 2, p. 411-417, Abr./Jun. 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n2.p411-417>

THOMAS, N. P. and EL SWAIFY, S. A. Construction and Calibration of a Rainfall Simulator. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.4, p.1-9, May./Aug. 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(89\)80001-0](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(89)80001-0)

VALIM, W. C.; PANACHUKI, E.; PAVEI, D. S.; ALVES SOBRINHO, T. ALMEIDA, W. S. Effect of sugarcane waste in the control of interrill erosion. **Semina: Ciênc. Agrár.**, v. 37, n.3, p. 1155-1164, Mai./Jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n3p1155>

VAN DIJK, A. I. J. M.; BRUIJNZEEL, L.A. E ROSEWELL, C.J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. **Journal of Hydrology**, v. 261, n.1-4, p. 1-23, Apr. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00020-3)

WACHA, K. M.; HUANG, C.; O'BRIEN, P. L.; PAPANICOLAOU, A. N. e HATFIELD, J. L. Quantifying the time-specific kinetic energy of simulated rainfall using a dynamic rain gauge system. **Agricultural & Environmental Letters**, 6, e20042, 2021. <https://doi.org/10.1002/ael2.20042>

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, Nov. 1982. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)

ZEMKE, J. J. Set-up calibration of a portable small scale rainfall simulator for assessing soil erosion processes at interrill scale. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, v. 43, n. 1, p. 63-81, 2017. <https://doi.org/10.18172/cig.3129>