



REVISTA
Casa da

ISSN 2316-8056

GEOGRAFIA
de Sobral

SIMULADORES DE CHUVAS: CONVERGÊNCIA ENTRE PARÂMETROS CIENTÍFICOS E DE USO NA REPLICAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NATURAL

Rain simulators: Convergence between scientific and usage parameters in the replication of natural precipitation

Simuladores de lluvia: convergencia entre parámetros científicos y de uso en la replicación de la precipitación natural

 <https://doi.org/10.35701/rcgs.v26.1001>

Jefferson Gomes Confessor¹

Lara Luíza Silva²

Silvio Carlos Rodrigues³

Histórico do Artigo:

Recebido em 09 de novembro de 2023

Aceito em 15 de setembro de 2024

Publicado em 19 de setembro de 2024

RESUMO

A natureza infrequente das chuvas, imprevisibilidade dos eventos, duração, intensidade e erosividade variável torna o processo de aquisição de dados oriundos de chuvas naturais um trabalho complexo, dificultando e até inviabilizando a execução de estudos científicos. Simuladores de chuvas surgem neste contexto como forma de contornar esta problemática, os quais buscam replicar da maneira mais fiel possível eventos de precipitação natural de maneira artificial. Para garantir maior confiabilidade de uso, parâmetros científicos foram traçados, regulando os princípios básicos dos atributos a serem replicados por estes equipamentos. Além disso, a utilização de simuladores de chuvas também deve assegurar as demandas próprias de cada pesquisa, influenciando na gama variada de modelos de equipamentos encontrada na literatura, os quais utilizam-se de distintos mecanismos para formação e distribuição da precipitação, cada qual desenvolvido para sanar as problemáticas específicas de cada pesquisa. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar os princípios básicos de funcionamento, usos, vantagens e desvantagens da utilização de diferentes modelos de simuladores de chuvas, de maneira a corroborar para o processo de compreensão de seu funcionamento e auxiliar

¹ Pós Doutorando em Geografia no Curso de Geografia da Universidade Federal de Catalão (UFCAT).


Email: jgconfessor01@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-2337-4884>

² Doutoranda em Geografia na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Email: laraluiza97@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-4054-6820>

³ Professor Adjunto do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Email: silgel@ufu.br

 <https://orcid.org/0000-0002-5376-1773>

na escolha do equipamento que melhor se adequa às demandas de cada pesquisa, contribuindo assim para melhoria da qualidade dos dados produzidos.

Palavras-Chave: Infiltrômetro de aspersão. chuva artificial. chuva simulada.

ABSTRACT

An infrequent nature of rainfall, the unpredictability of events, variable duration, intensity, and erosiveness make the process of acquiring data from natural rains a complex task, hindering and even rendering the execution of scientific studies difficult. Rain simulators emerge in this context as a way to overcome this issue, aiming to replicate natural precipitation events as faithfully as possible artificially. To ensure greater reliability of use, scientific parameters have been established, regulating the basic principles of the attributes to be replicated by these devices. Furthermore, the use of rain simulators must also meet the specific demands of each research, influencing the diverse range of equipment models found in the literature, which employ different mechanisms for the formation and distribution of precipitation, each developed to address the specific challenges of individual studies. In this sense, this work aims to present the fundamental principles of operation, uses, advantages, and disadvantages of different rain simulator models, in order to contribute to the understanding of their functioning and assist in choosing the equipment that best suits the demands of each research, thus enhancing the quality of the produced data.

Keywords: Sprinkler infiltrometer. Artificial rainfall. Simulated rain.

RESUMEN

La naturaleza infrecuente de las lluvias, la imprevisibilidad de los eventos, la duración, intensidad y variabilidad erosiva hacen que el proceso de adquisición de datos de las lluvias naturales sea un trabajo complejo, dificultando e incluso imposibilitando la realización de estudios científicos. Los simuladores de lluvias surgen en este contexto como una forma de superar este problema, buscando replicar de la manera más fiel posible eventos de precipitación natural de forma artificial. Para garantizar una mayor confiabilidad en su uso, se han establecido parámetros científicos que regulan los principios básicos de los atributos que deben ser replicados por estos equipos. Además, la utilización de simuladores de lluvias también debe asegurar las demandas específicas de cada investigación, lo que influye en la amplia gama de modelos de equipos encontrados en la literatura. Estos modelos utilizan distintos mecanismos para la formación y distribución de la precipitación, cada uno desarrollado para resolver los problemas específicos de cada investigación. En este sentido, este trabajo tiene como objetivo presentar los principios básicos de funcionamiento, usos, ventajas y desventajas de diferentes modelos de simuladores de lluvias, con el fin de contribuir al proceso de comprensión de su funcionamiento y ayudar en la elección del equipo que mejor se adapte a las necesidades de cada investigación, contribuyendo así a mejorar la calidad de los datos producidos.

Palabras clave: Infiltrómetro de aspersión. Lluvia artificial. Lluvia simulada.

INTRODUÇÃO

As distintas paisagens produzidas ao longo do globo podem ser compreendidas como produto direto da interação entre as variáveis geológicas, geomorfológicas, pedológicas, climáticas, biológicas e antrópicas (SOTCHAVA, 1978; LEPSCH, 2011), sendo resultantes das especificidades presentes nos locais as quais se inserem.

Os processos envolvidos em suas transformações se efetivam através de significativa complexidade, reflexos de um ambiente sistêmico e das distintas formas que suas partes interagem, não somente no presente, mas também em tempos passados (TRICART, 1977), sendo compreendidas como heranças de tempos pretéritos, os quais culminaram nas condições atuais (AB'SÁBER, 2003).

Seu entendimento deve ser realizado de forma conjunta, através da análise dos elementos que as constituem (BERTRAND, 1968). Neste sentido, dentre os elementos paisagísticos, nota-se um que possui capacidade de promover a interconectividade dos demais componentes: a água.

Importante agente no transporte de massa e energia (WOOD, 2002), a água em seu ciclo global adiciona, transforma e realoca elementos, desencadeando processos físicos e químicos, com respaldo em fatores biológicos, se tornando um elemento capaz de imprimir características próprias ao meio (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1988; OKI, 1999; CHAPLIN, 2001; ARTUR et al., 2014; EHLERS e GOSS, 2016; WESTALL e BRACK, 2018).

Deste modo, a compreensão da dinâmica da água mostra-se relevante, visto que seu movimento reverbera nos demais constituintes do sistema, possuindo caráter de gênese e conexão dos processos existentes em superfície e subsuperfície (TRICART, 1977).

Sua principal forma de entrada nos ambientes terrestres ocorre por meio das chuvas (MELLO e VIOLA, 2013), e, a partir de sua disponibilidade, os processos dependentes passam a ocorrer. Portanto, compreender as formas de entrada da água e como se efetiva sua interação com os demais elementos permite gerar informações relevantes sobre a dinâmica dos ambientes, expondo dados de comportamento, mobilização e gênese dos processos.

No entanto, a natureza infrequente das chuvas, imprevisibilidade dos eventos, duração e intensidade variável torna o processo de aquisição de dados oriundos de chuvas naturais um trabalho complexo, encarecendo os custos de produção, de maneira a dificultar e até inviabilizar a execução de projetos (MILLER, 1987; ESTEVES et al., 2000).

Apesar de ideais (HUDSON, 1995), métodos que se baseiam na prospecção de dados advindos de chuvas naturais se mostram enrijecidos, limitando os estudos às características casuais e esporádicas dos eventos (BERTOL et al., 2012; CONFESSOR, 2023). Visando contornar esta problemática, simuladores de chuvas surgem neste contexto como ferramentas capazes de replicar de forma artificial as características naturais das chuvas.

Utilizados em diferentes estudos (AL MAMOON et al., 2019; WANG et al., 2020; ZAMBON, 2021; CONFESSOR et al., 2021; FANG et al., 2022; RONČEVIĆ et al., 2023; STAŠEK et al., 2023), estes equipamentos auxiliam no aceleração da aquisição dos dados relativos a dinâmica hídrica, não se limitando apenas ao ambiente de campo, mas também com possibilidade de replicar cenários em laboratório, conferindo maior rigor e controle das variáveis envolvidas (BOWYER e BURT, 1989; HUMPHRY et al., 2002).

Através de seu uso, permite-se determinar taxas de infiltração, erodibilidade dos solos, parametrizar modelos, avaliar o transporte de poluentes, avaliar cultivos ou efeitos do tratamento prático, além de outras aplicações de particular interesse para cada grupo de pesquisa (GRISMER, 2011).

Diferentes modelos de equipamentos são utilizados, os quais exibem distintos princípios de aplicação de água sobre a superfície, em que, cada equipamento baseia-se em estratégias que visam exibir melhor capacidade de funcionamento e qualidade da informação produzida, refletindo em vantagens e desvantagens que devem ser ponderadas em seus respectivos usos.

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar os princípios básicos de funcionamento, usos, vantagens e desvantagens da utilização de dois principais modelos de simuladores de chuvas, sendo: de aspersão e de gotejamento; de modo a auxiliar no processo de escolha da ferramenta que melhor se adeque às demandas de cada pesquisa, contribuindo assim para melhoria da qualidade dos dados produzidos.

DESENVOLVIMENTO

Simuladores de chuva

Simuladores de chuva buscam através de seu funcionamento replicar as características das precipitações naturais de forma artificial, tendo como princípio de operação a aplicação da água sobre a superfície em forma de gotas, como ocorrente em uma chuva natural (ALVES SOBRINHO et al., 2002).

Por meio de seu funcionamento, replica-se também os processos dependentes das gotas de chuva, se assemelhando ao funcionamento natural e seus efeitos (DUNKERLY, 2008), produzindo um estudo mais completo, e, apesar de não idêntico, mais condizente possível com a realidade dos fatos.

A simples produção de gotas não torna qualquer equipamento um simulador de chuvas, visto que as pluviosidades reais possuem características intrínsecas para cada evento (MONTEBELLER et al., 2001). Visando aferir maior confiabilidade de uso, parâmetros mínimos foram estipulados para calibração de simuladores de chuvas como equipamentos de aquisição de dados hidrogeomorfológicos (BERTOL et al., 2012; LORA et al., 2016), atribuindo características às chuvas simuladas de modo que expressem atributos semelhantes às precipitações naturais (MEYER e HARMON, 1979; TOSSEL et al., 1987), devendo atender os seguintes critérios:

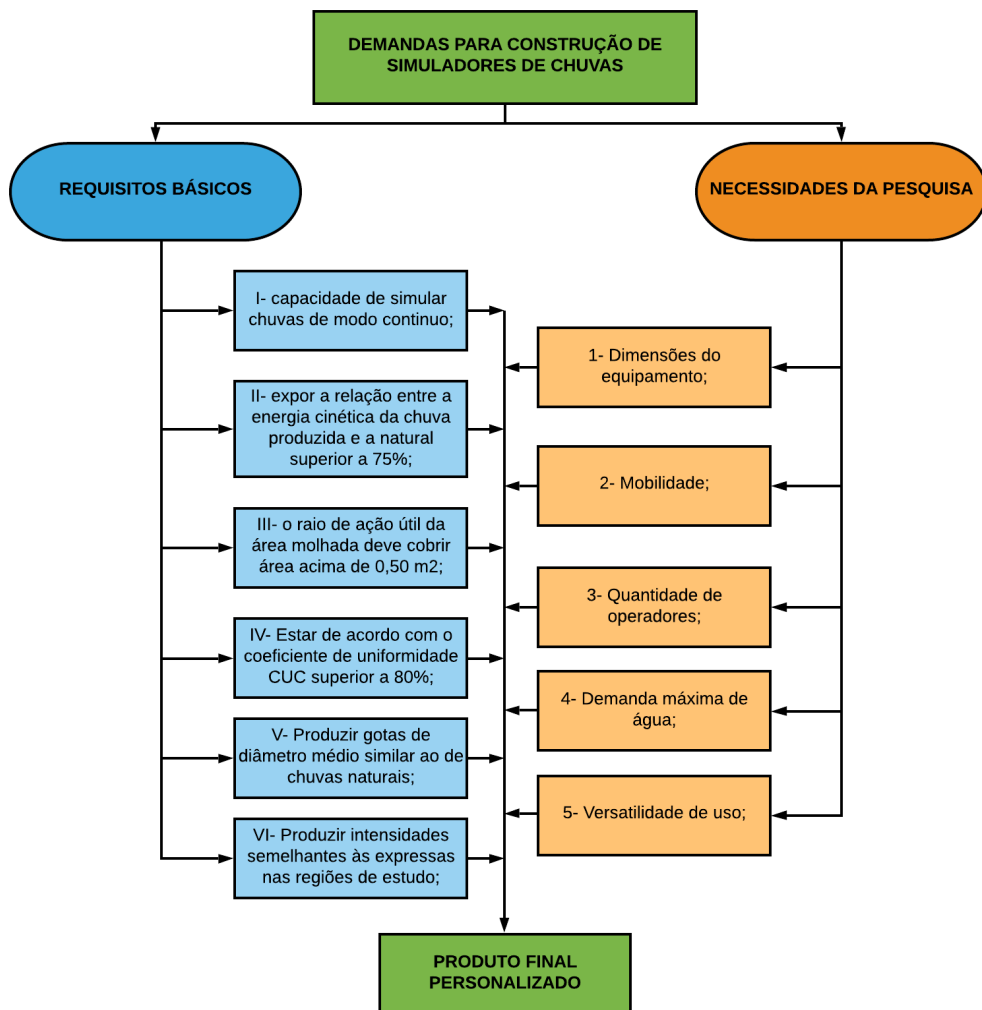
- 1- Realizar aplicação de água de forma contínua sobre a área de testes;
- 2- Expressar área molhada superior a 0,50 m²;
- 3- Apresentar distribuição homogênea da precipitação, exibindo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) acima de 80 % (CHRISTIANSEN, 1942);
- 4- Apresentar gotas com diâmetro médio similar às gotas naturais;
- 5- As gotas produzidas devem colidir com a superfície em

velocidade terminal próxima às de gotas naturais de diâmetro semelhante, expondo relação entre a energia cinética das gotas produzidas e naturais de no mínimo 75 %; e por fim, 6- Replicar intensidades que representem as características das regiões geográficas de onde os estudos serão realizados (TOSSEL et al. 1987; ALVES SOBRINHO et al., 2002; CONFESSOR e RODRIGUES, 2018).

Além dos critérios científicos básicos, as características dos simuladores também devem atender as demandas de uso individuais de cada pesquisa, como: 1- Dimensões do equipamento; 2- Mobilidade; 3- Quantidade de operadores; 4- Demanda máxima de água; 5- Versatilidade de uso; e 6- Custo de produção e de funcionamento (CONFESSOR, 2023).

Desta maneira, a construção de simuladores de chuvas perpassa pela convergência de parâmetros científicos e de uso (FIGURA 1), refletindo na produção de equipamentos personalizados, com características necessárias para sanar as demandas dos mais variados tipos de pesquisas (GUERRA, 2005).

Figura 1: Demandas básicas para construção de simuladores de chuvas.



Fonte: Autor.

Tamanho e velocidade das gotas: Atributos a serem replicados

As gotas constituem-se como elemento fundamental a ser reproduzido em estudos que envolvem chuvas simuladas por aspersão (BISAL, 1960), tornando-se um fator chave para construção de simuladores de chuvas, visto que diversos processos são dependentes, havendo a ocorrência limitada pela presença e características das mesmas (GHADIR e PAYNE, 1988; AMORIM et al., 2001).

Partindo do princípio do funcionamento da chuva natural, as nuvens posicionadas a algumas dezenas de metros acima da superfície apresentam-se constituídas por grandes agrupamentos de gotículas, dotadas de diâmetro médio próximo a 20 μm (PRUPPACHER e KLETT, 1997; GAO et al., 2022).

O tamanho reduzido permite às gotículas se manterem em suspensão, e, sob condições ideais, ao atingirem diâmetros superiores a 36 μm se tornam gotas coletoras (PRUPPACHER e KLETT, 1997), agregando em seus volumes gotas vizinhas por meio do processo de colisão, num movimento de crescimento exponencial até se tornarem gotas pesadas o suficiente para iniciarem o movimento de queda, ou em outras palavras, precipitarem-se.

Cada precipitação é única, possuindo características que variam não somente entre precipitações, mas também dentro do próprio evento (ATLAS et al., 1999; KIM et al., 2022). Sendo assim, as chuvas naturais não exibem um número ou tamanho homogêneo de gotas, cada precipitação é caracterizada pelo conjunto heterogêneo de diferentes números e escalas de diâmetros de gotas (MADDEN et al., 1998). Esta variabilidade é dada por fatores intrínsecos de cada evento, como temperatura, vento, pressão, umidade do ar e altitude.

Laws e Parsons (1943), analisando precipitações naturais no leste dos Estados Unidos, notaram uma correlação do aumento do diâmetro das gotas com o aumento da intensidade, apresentando diâmetro médio (D_{50}) de aproximadamente 2 mm em chuvas de intensidade próximas à 50 mm/h, aumentando até gotas de 3 mm (D_{50}) em precipitações de 200 mm/h. Porém, Hudson (1963) em estudos de chuva tropical, indicou esta correlação apenas em pluviosidades de até 100 mm, havendo após este valor o decréscimo do tamanho das gotas.

Coutinho e Tomás (1995) analisando precipitações de diferentes intensidades no Vale Formoso – Portugal, expuseram grande amplitude nos diâmetros médios das gotas nas diferentes intensidades, com valores médios mínimos e máximos encontrados de 1,2 mm (D_{50}) até 1,6 mm (D_{50}), demonstrando relação razoável entre o crescimento das gotas e o aumento da intensidade das chuvas.

Atlas et al. (1999) em estudo no Atol de Kapingamarangi - Estados Federados da Micronésia, ao classificarem as gotas precipitadas perceberam diferenças notórias em seus tamanhos

ao longo de uma mesma precipitação, exibindo diâmetros de 2,41 mm no terço inicial, 1,51 mm no terço médio e 1,16 mm no terço final.

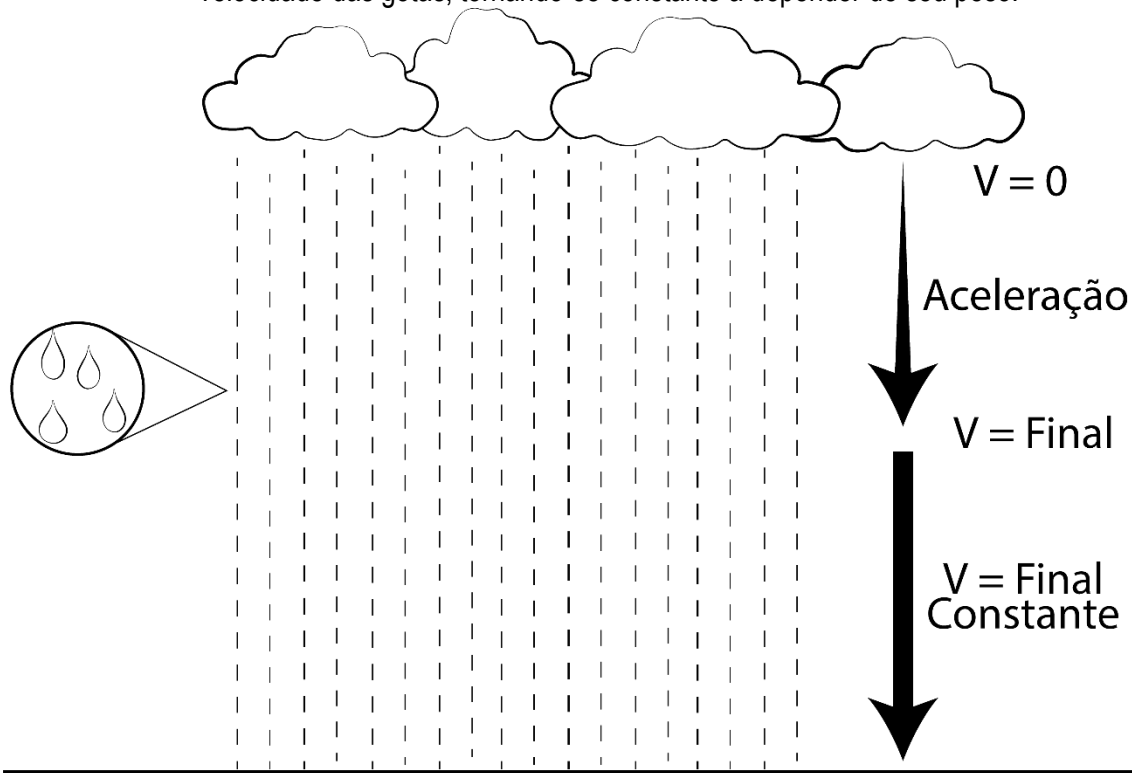
Deste modo, a relação do tamanho das gotas com as intensidades e ao longo das precipitações ainda não se apresenta muito bem compreendida, necessitando de um conjunto maior de dados para endossar esta discussão (CERDA, 1997), especialmente se tratando de intensidades de chuvas mais volumosas, as quais são mais esporádicas, tornando-as mais difíceis de se avaliar.

Ao precipitarem das nuvens, cada gota parte do “repouso”, e no movimento de queda entre a nuvem e a superfície adquirem velocidade. A velocidade máxima que cada gota pode adquirir neste processo de queda está intimamente ligada a seu peso, de modo que alterações nos diâmetros das gotas produzem variações em suas velocidades (BEARD, 1976).

Fatores como forma do objeto e o atrito que o mesmo se sujeita ao transpor o ar atmosférico também influenciam em sua velocidade final. Sendo assim, a velocidade de cada gota ao atingir a superfície não se baseia apenas em sua altura de queda, mas também em seu peso, forma e condições atmosféricas (SAUVAGEOT e KOFFI, 2000; GONÇALVES e MASSAMBANI, 2010).

A altura proporciona espaço suficiente para que as gotas desenvolvam velocidade, sendo normalizada por forças de atrito atuantes, tornando a velocidade de queda constante não importando o quão distantes as gotas ainda se apresentem em relação ao solo (NISSEN et al., 2005), sendo este movimento conhecido como velocidade final de queda (FIGURA 2), o qual tem relação direta com a energia cinética de cada gota.

Figura 2: Esquema representativo da velocidade de gotas de chuva. Gotas partem do repouso (V_0) e por meio da aceleração adquirem velocidade; o atrito com o ar gera resistência e normaliza a velocidade das gotas, tornando-se constante a depender de seu peso.



Fonte: Autor.

A energia cinética pode ser compreendida como a energia que um corpo possui em razão de seu movimento, sendo associada a sua massa. Quanto maior a energia cinética, maior potencial de danos a superfície as gotas terão, havendo relação direta com a erosividade das chuvas.

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

E_c = Energia cinética

m = Massa

v = velocidade

Visto isto, os simuladores de chuvas possuem por função não apenas replicar de maneira mais fiel possível os diâmetros das gotas geradas, mas também devem assegurar que cada uma delas atinja o solo em velocidades finais, semelhantes às produzidas por precipitações naturais (MONTEBELLER et al., 2001; SPOHR et al., 2015).

Neste sentido, as principais adversidades em se projetar um simulador de chuvas perpassam em fatores que envolvem a produção das gotas (REGMI e THOMPSON, 2001), pois suas

características influenciam diretamente nas demais variáveis, como: intensidade, distribuição e erosividade das chuvas.

Na literatura é possível observar uma gama variada de modelos de simuladores de chuvas que visam replicar o fenômeno da precipitação por meio de um dispositivo que corresponda a escala de interesse do processo, as necessidades da pesquisa e aos recursos disponíveis, apresentando variações nas dimensões e princípios de funcionamento, como: altura, área de ação, intensidade e tamanho de gotas (MORIN et al., 1967; MEYER e HARMON, 1978; TOSSEL et al., 1987; BOWYER e BURT, 1989; CERDÀ, 1999; BLANQUIES et al., 2003; ABUDI et al., 2012; KIBET et al., 2014; KINNELL, 2016; COMINO et al. 2018, CONFESSOR 2019; WEN et al., 2022; FERNÁNDEZKINNELL et al., 2022; JAQUETH et al., 2023).

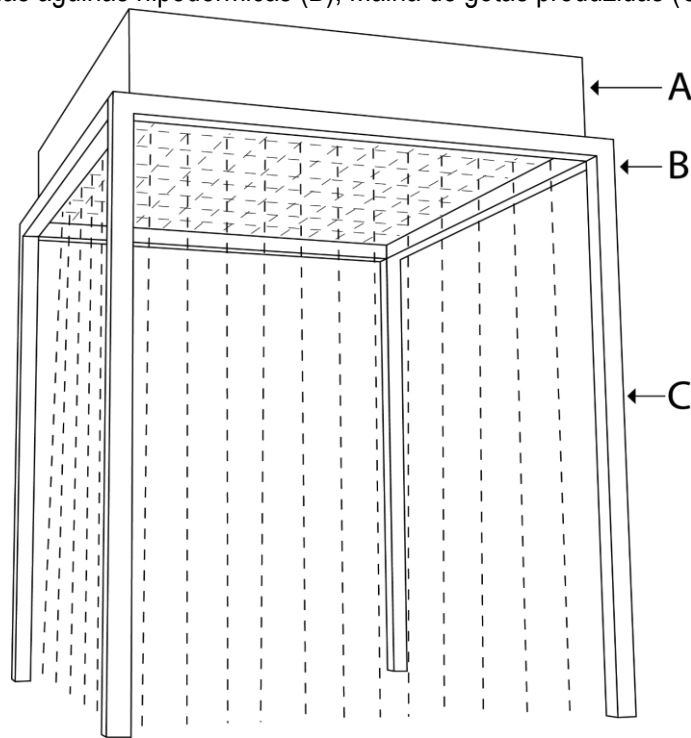
Distintas são as formas de obtenção da precipitação artificial (CERDÀ, 1999; GRISMER, 2011), cada qual expondo vantagens e desvantagens (CLARKE e WALSH, 2007), não existindo um modelo de simulador superior aos demais, mas sim equipamentos que melhor se adequam as demandas individuais de cada pesquisa.

Neste sentido, os simuladores de chuvas podem ser classificados de acordo com o princípio de funcionamento adotado, subdividindo-se entre dois tipos mais utilizados, sendo: simuladores de gotejamento e simuladores de bicos de aspersão (ESTEVES et al., 2000; BATTANY e GRISMER, 2000).

Simuladores de gotejamento: Princípios básicos de funcionamento

Simuladores de gotejamento operam de maneira a produzir gotas através de uma malha de orifícios, elaborada em um recipiente armazenador de água posicionado acima do solo (FIGURA 3). Nestes furos, são inseridos tubos capilares (HALL, 1970; REGMI e THOMPSON, 2000), como agulhas hipodérmicas (BATTANY e GRISMER, 2000; KUMAR et al., 2004; ABUDI et al., 2012), tubos de vidro ou acrílicos (FERNÁNDEZ et al., 2008; JOY et al., 2013), os quais, por meio da pressão da coluna de água armazenada, geram gotas de tamanho estimado.

Figura 3: Modelo de mini-simulador de chuvas com gotas produzidas por meio de agulhas hipodérmicas: caixa de armazenagem de água (A); produção de gotas por meio da passagem da água nas agulhas hipodérmicas (B); Malha de gotas produzidas (C).



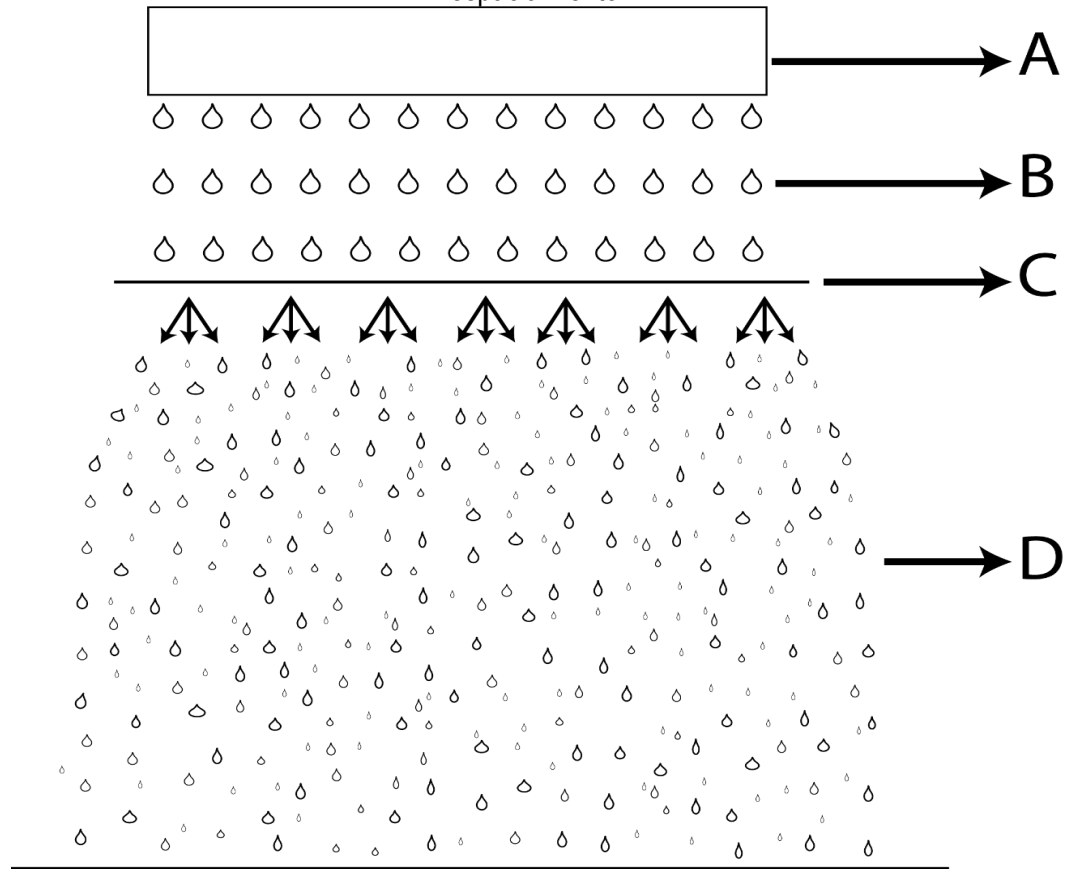
Fonte: Adaptado de Ngasoh et al. (2020).

A medida em que as gotas são produzidas, o recipiente no qual as agulhas se fixam recebe água de outro recipiente comunicante, conferindo altura constante da coluna d'água sobre os capilares, produzindo mesma pressão durante a simulação, e por consequência, gerando gotas homogêneas, podendo o diâmetro das gotas produzidas ser alterado através da mudança de altura da coluna d'água.

A homogeneidade das gotas geradas por este tipo de equipamento é tamanha que vai muito além do natural, se tornando uma chuva de gotas "siamesas", e por serem formadas em um ambiente estático, as gotas produzidas pelos capilares chocam-se com a superfície sempre no mesmo local, formando um evento pontual e incisivo (KLEIJN et al., 1979; GRISMER, 2011).

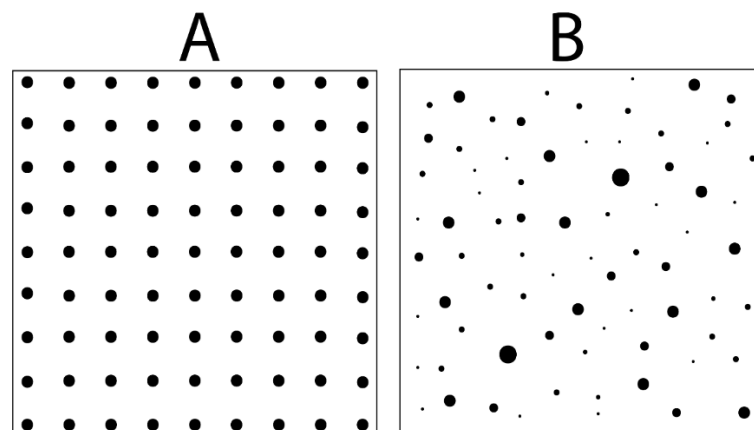
Uma alternativa para conferir o espalhamento e produzir diferentes diâmetros de gotas se efetiva na inserção de uma malha fina posicionada abaixo das agulhas ou tubos formadores de gotas, quebrando-as com o impacto e as redistribuindo sobre a superfície (ROTH e HELMING, 1992) (FIGURA 4 e 5).

Figura 4: Quebra e espalhamento de gotas produzidas por um simulador de chuvas gotejante. Reservatório e tubos formadores de gotas (A); Gotas homogêneas (B); Malha para quebra e redistribuição das gotas (C); Gotas redimensionadas em menores calibres e redistribuídas espacialmente.



Fonte: Autor.

Figura 5: Distribuição fictícia do impacto das gotas produzidas por um simulador de chuvas gotejante. Disposição espacial das gotas intimamente ligada ao posicionamento dos tubos formadores de gotas (A); Gotas redimensionadas e redistribuídas, efeito promovido pela passagem das gotas produzidas por uma malha posicionada entre o reservatório e a superfície (B).



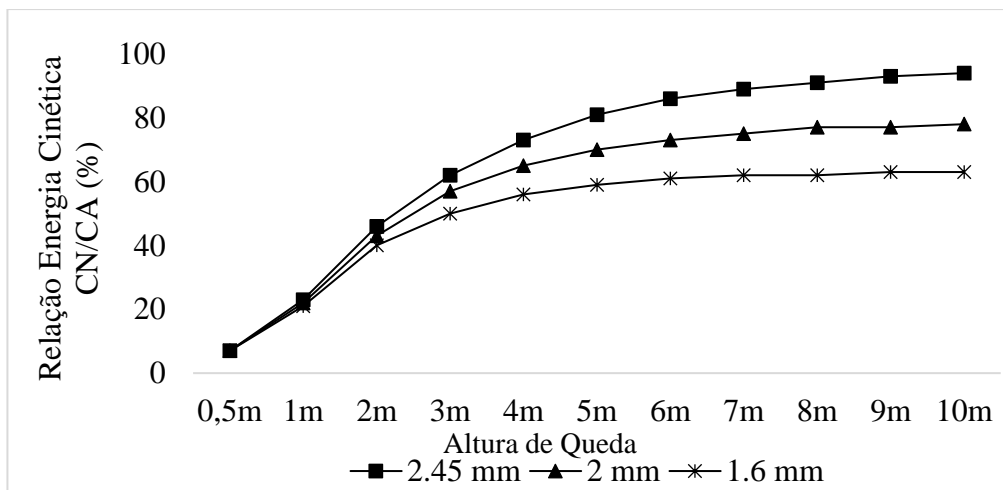
Fonte: Autor.

A ampla distribuição de furos e o padrão de funcionamento estático, confere aos simuladores de gotejamento elevados coeficientes de uniformidade, frequentemente superiores a 90% (GRISMER, 2011). Entretanto, as dimensões usuais deste tipo de equipamento não proporcionam distâncias ideais de queda para que as gotas possam adquirir velocidades terminais máximas, subestimando a energia cinética das chuvas replicadas, e, por consequência, sua erosividade (ROBINSON e NAGHIZADEH, 1992).

Ribeiro (2006) utilizando-se de um simulador de 3,31 metros de altura, produzindo gotas de diâmetro médio de 2,45 mm, encontrou baixa relação entre a energia cinética das gotas artificiais produzidas e as naturais de mesmas características (61%), refletindo na redução da erosividade das chuvas produzidas.

Para apresentar correlação significativa entre a energia cinética de gotas naturais e produzidas, este modelo de simulador demanda de um gradiente de altura entre a base de produção das gotas e a superfície de experimentos muito elevado (EPEMA e RIEZEBOS, 1983; HIGNETT et al., 1995), de forma a tornar seu redimensionamento uma opção não viável, pois, a altura necessária para que as gotas atinjam sua velocidade terminal máxima extrapola as condições de uso do equipamento, limitando e até inviabilizando seu uso (GRÁFICO 1).

Gráfico 1: Correlação entre a energia cinética de gotas de chuva artificial (CA) e chuva natural (CN) em relação à altura de queda. Gráfico gerado pelo programa computacional Enerchuva, considerando intensidade de 60 mm/h e gotas de 2,45 mm, 2mm e 1,6 mm de diâmetro.



Fonte: Autor, utilizando o programa computacional Enerchuva (Alves Sobrinho et al., 2001).

Apesar de mais populares em anos passados, atualmente este tipo de simulador tem apresentado baixa utilização em trabalhos científicos. Ao analisar pesquisas envolvendo o uso de simuladores entre os anos 2000 e 2010, Grismer (2011) notou que em apenas 20 % destas foram

adotados o uso de simuladores de gotejamento. A baixa aceitação deve-se às limitações deste tipo de equipamento, apresentando baixa cinética de gotas, mobilidade reduzida e dificuldade de manejo à campo (GRISMER, 2011).

Simuladores de aspersão: Funcionamento e comparação com simuladores de gotejamento

Uma opção para conferir maiores velocidades as gotas simuladas em distâncias reduzidas se efetiva por meio da pressurização da água (MILLER, 1987). Partindo disto, bicos de aspersão são encontrados no mercado para desempenhar diversas finalidades, desenvolvidos para execução de funções industriais, agrícolas e de segurança (CUNHA et al., 2005; VISSOTTO et al., 2006; BAYER et al., 2018).

Apesar deste foco seletivo em seu desenvolvimento, bicos de aspersão foram incorporados por diferentes autores para a construção de simuladores de chuvas (GRISMER, 2011). O princípio básico de seu funcionamento consiste na pressurização do fluido e sua posterior passagem por um pequeno orifício de saída, conferindo a “quebra” do fluxo e originando as gotas (CUNHA et al, 2004).

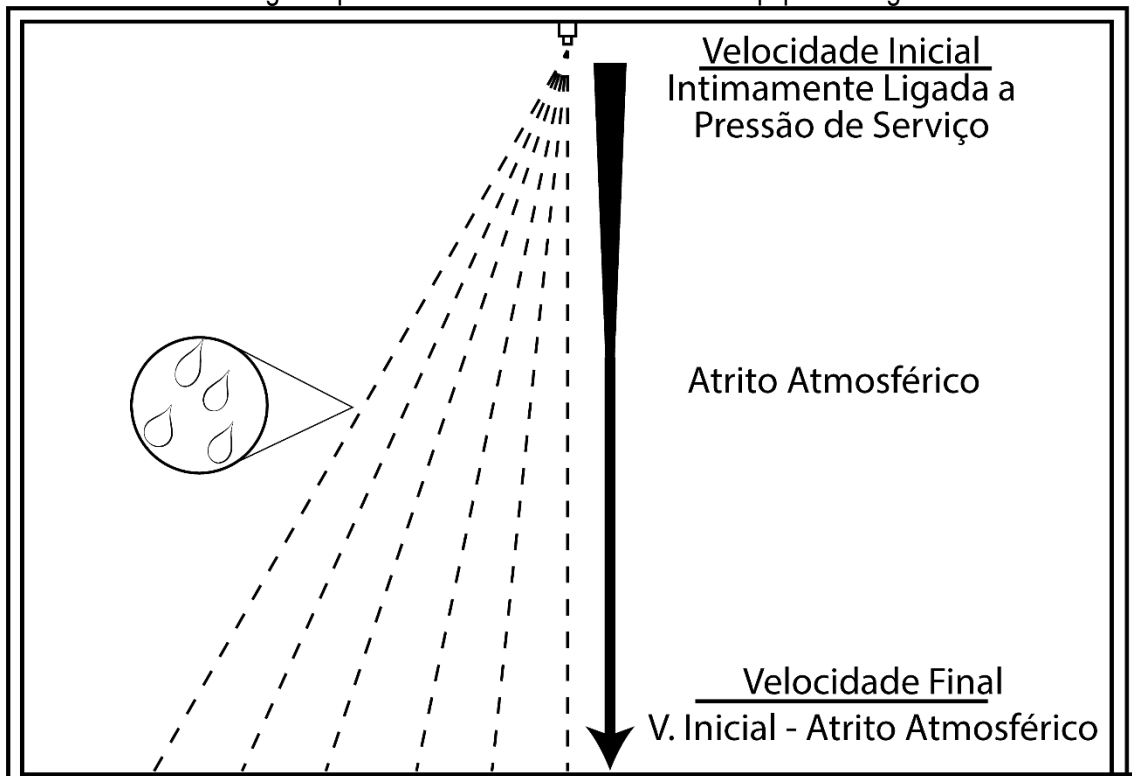
Um bico pode produzir diferentes calibres de gotas, variando de acordo com a pressão exercida sobre o mesmo (NAVAS et al., 1990). Normalmente, quanto mais alta a pressão de serviço menores serão os diâmetros das gotas e maiores velocidades irão apresentar (MONTEBELLER et al, 2001, CONFESSOR, 2023).

Diferente do simulador de gotejamento, no qual as gotas geradas sob determinada coluna d’água se mostram homogêneas, simuladores de aspersão formam uma gama variada de diâmetros de gotas sob mesma pressão de serviço (SPHOR, 2015), replicando de maneira mais condizente o comportamento das chuvas naturais.

Neste tipo de equipamento, a velocidade de queda das gotas logo após a passagem pelo orifício de sua formação normalmente se mostra mais rápida quando comparado as velocidades terminais de gotas naturais de mesmo tamanho (CONFESSOR et al., 2022) (FIGURA 6).

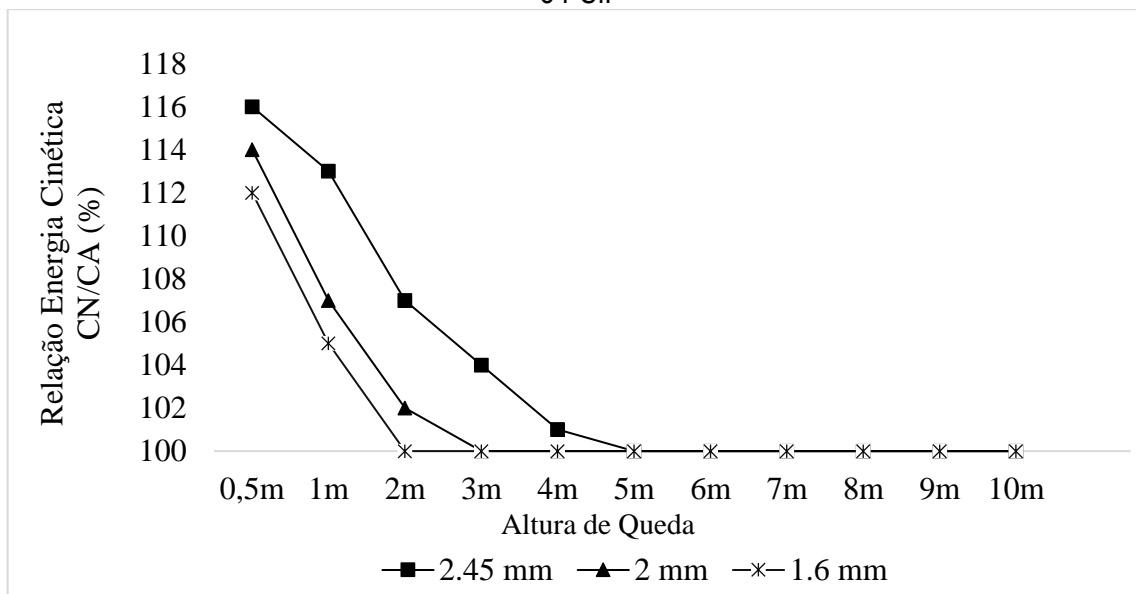
Para reduzir a velocidade e assegurar maior correlação com eventos naturais, demanda-se de uma distância mínima entre o aspersor e a superfície, de modo a expor as gotas ao atrito do ar atmosférico, e por consequência, ocasionando a redução de suas velocidades (GRÁFICO 2). A distância ideal entre o aspersor e o solo apresenta variações, a depender da pressão de serviço e tamanho das gotas produzidas.

Figura 6: Produção de gotas por simulador de aspersão. Gotas no momento de saída do bico de aspersão apresentam velocidade maior que as gotas naturais de mesmo diâmetro; após atrito com o ar atmosférico as gotas perdem velocidade de forma a se equiparar às gotas naturais.



Fonte: Autor.

Gráfico 2: Correlação entre a energia cinética de gotas de chuva simulada (CS) e natural (CN) em relação à altura de queda. Gráfico gerado pelo programa computacional Enerchuva, considerando a intensidade de 60 mm/h, gotas de 2,45 mm, 2mm e 1,6mm de diâmetro e pressão de funcionamento de 5 PSI.

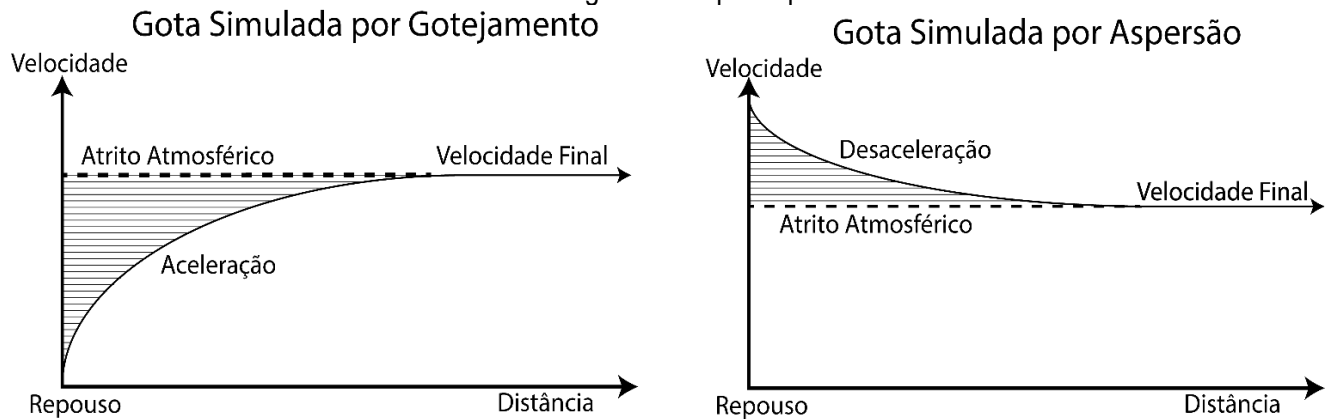


Fonte: Autor, utilizando o programa computacional Enerchuva (Alves Sobrinho et al., 2001).

Neste sentido, observa-se que, simuladores de aspersão e de gotejamento apresentam no ato de produção de gotas relações inversas de velocidades (FIGURA 7), havendo em simuladores de gotejamento o ganho de velocidade ao longo da distância percorrida, já em simuladores de bico o decréscimo da velocidade.

Esta característica reflete diretamente na altura dos equipamentos produzidos, permitindo aos simuladores que se utilizam de bicos a fabricação de equipamentos com dimensões mais reduzidas, viabilizando e ampliando seu uso em uma gama variada de locais, especialmente à campo.

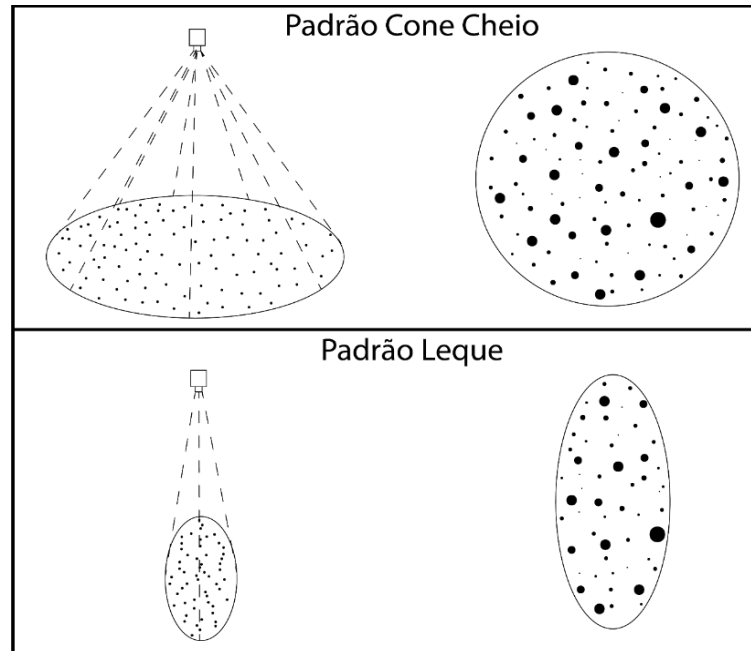
Figura 7: Diferenças no comportamento da velocidade das gotas produzidas por simuladores de aspersão e gotejamento. Gotas produzidas por infiltrômetros de gotejamento partem do repouso e adquirem velocidade ao longo de seu processo de queda. Gotas produzidas por infiltrômetros de aspersão apresentam velocidades maiores que as naturais no ato de sua produção, sendo este movimento desacelerado ao longo de sua queda pelo atrito com o ar.



Fonte: Autor.

Com relação a distribuição das gotas, simuladores de aspersão apresentam diferentes métodos para realizar seu espalhamento (TOSSELL et al., 1987; SPOHR et al., 2015), estando intimamente ligados às características de cada ponta de aspersão. Bicos aspersores apresentam diferentes modelos e princípios de funcionamento, classificados de acordo com as características dos jatos de saída, sendo conhecidos como: jato de cone oco; cone cheio; leque e sólido (GRISMER, 2011). Dentre estes, os mais utilizados para simulações de chuvas são os bicos de cone cheio e leque (KAVKA e NEUMANN, 2021) (FIGURA 8).

Figura 8: Exemplos de padrões de distribuição de gotas de diferentes tipos de bicos aspersores.



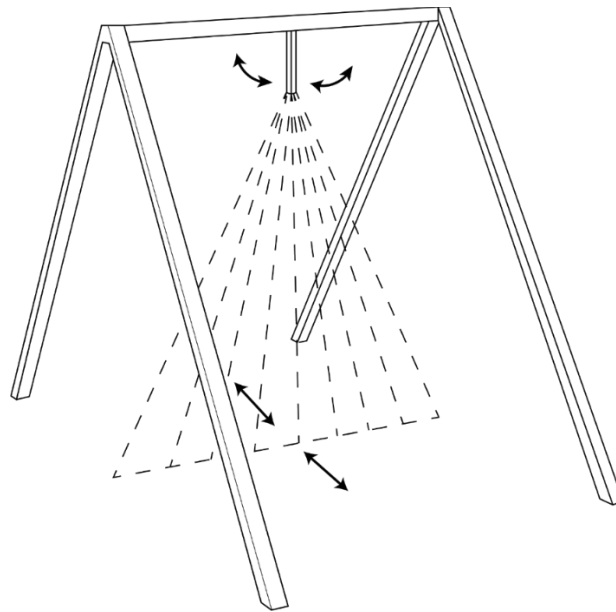
Fonte: Autor.

Ao colidir com a estrutura do bico, o fluxo de água se desintegra em pequenas partes que são lançadas aleatoriamente sobre a superfície. A uniformidade da aplicação sobre a área é influenciada por fatores como: pressão de serviço; diâmetros dos bocais; geometria e rugosidades dos orifícios; inclinação; velocidade de lançamento do jato; altura do emissor em relação ao solo; estabilidade da haste de sustentação do emissor; distância entre os emissores; velocidade e a direção do vento (COSTA, 1994).

Aspersores que produzem jatos do tipo leque distribuem as gotas por uma delgada linha de aspersão, não atingindo a área mínima estipulada para sua utilização em chuvas simuladas (0,50 m²). A solução para recobrir áreas maiores e produzir o espalhamento mais homogêneo das gotas sobre a superfície se consolidou em ofertar movimento ao bico, de modo a produzir contínuas passagens sobre as áreas desejadas. Na literatura encontram-se duas formas básicas de produção deste movimento dinâmico, podendo ser obtido por meio da oscilação e/ou rotação dos aspersores (FIGURA 9 e 10).

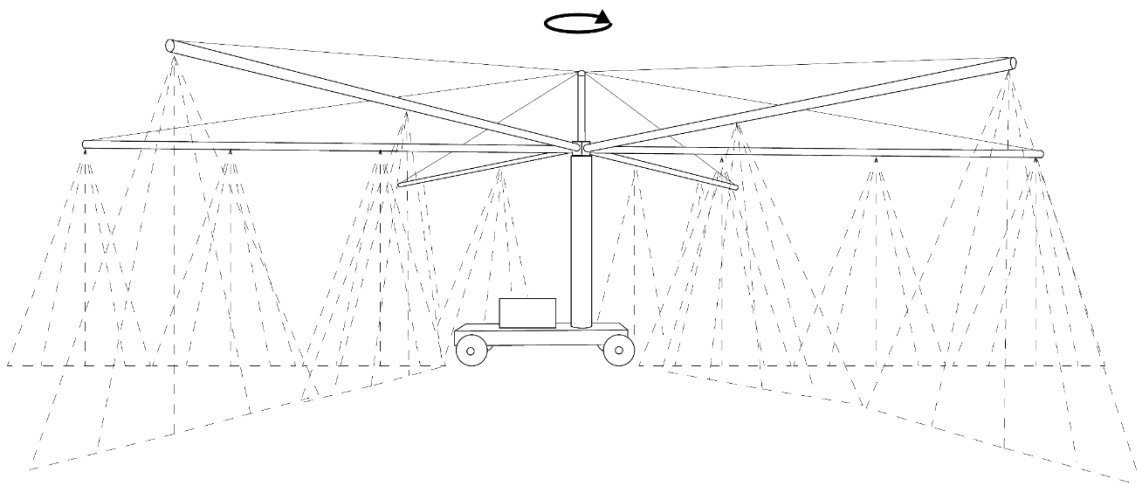
Neste contexto, diversos modelos de simuladores foram desenvolvidos através da adoção deste método, os quais utilizaram-se de 1 ou mais aspersores, recobrendo áreas de 0,7 m² a até 77 m² (ALVES SOBRINHO et al., 2002; MONTEBELLER et al., 2001; BERTOL I., BERTOL C. e BARBOSA, 2012; XU et al., 2020; KAVKA e NEUMANN, 2021).

Figura 9: Modelo de simulador de chuvas de bico de aspersão único e oscilante.



Fonte: Autor.

Figura 10: Modelo de simulador de chuvas rotacional dotado de diversos bicos de aspersão.



Fonte: Autor, baseado em BERTOL et al. (2012) (B).

A grande crítica a este método está relacionada em como o movimento se efetiva. A rotação e/ou oscilação contínua dos bicos apesar de em parte replicar o efeito do vento sobre a precipitação, pode vir a ocasionar distúrbios nas áreas de experimentos, devido às sucessivas e ininterruptas passagens na mesma direção (KINNEL, 1993), conduzindo processos em superfície.

Além disto, este tipo de padrão subestima em demasia os volumes pontuais precipitados (PAIGE et al., 2003, GRISMER, 2011), visto que, para conferir homogeneidade de aplicação, os aspersores devem apresentar repetidas passagens sobre a superfície, sendo o volume precipitado a média das passagens.

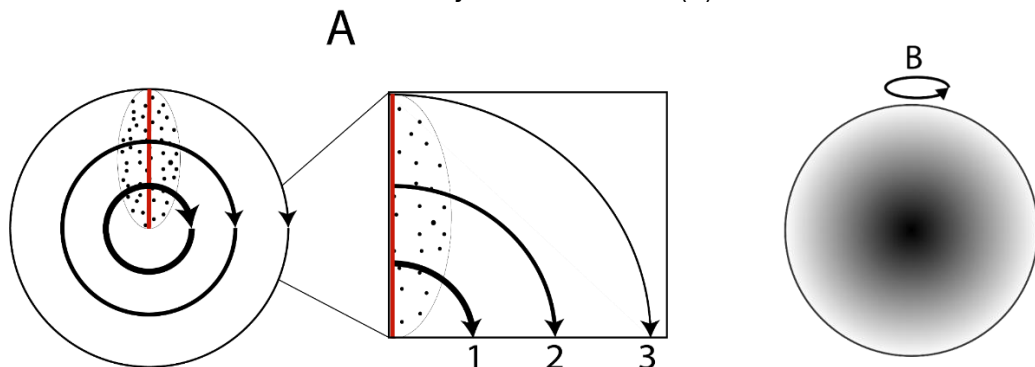
As "ondas" de chuva geradas por cada passagem podem resultar em intensidades instantâneas localizadas que vão muito além da média geral. Para um simulador baseado em bicos do tipo leque, em uma precipitação de intensidade média de 100 mm/hr, foram encontradas médias instantâneas de 2.000 mm/hr (GRISMER, 2011).

Estas características repercutem diretamente na qualidade dos dados apresentados, pois, ao considerar os volumes médios, as intensidades reais são mascaradas, podendo as mesmas se tornarem pluviosidades irreais quando tratadas da forma correta, muito acima das apresentadas naturalmente, repercutindo na formação de processos e induzindo a errôneas comparações de taxas de infiltração, erosão, escoamento, erodibilidade e erosividade entre trabalhos.

Além disso, simuladores que se utilizam do movimento de rotação, a distribuição da precipitação usualmente exhibe maiores intensidades em suas áreas centrais. Por se tratar de um movimento rotacional, a barra na qual os bicos se fixam apresenta variações de velocidade ao longo da extensão de seu comprimento, sendo que, quanto mais extensa for, maior será a diferença de velocidade entre seu centro e sua extremidade.

A consequência desta variação reflete em alterações da intensidade precipitada, pois, a parte externa da haste necessita percorrer uma área maior que parte interna (FIGURA 11), gerando maiores volumes nas áreas centrais e decrescendo em direção as partes externas.

Figura 11: Modelo de distribuição da intensidade de precipitação em um simulador de aspersão rotacionário fictício. Movimento giratório da barra de aspersão exhibe variação na velocidade, apresentando-se maior quanto mais distante do centro. A velocidade menor exibida nas regiões mais centrais reflete em maiores intensidades. Intensidade $A_1 = 1$, intensidade $A_2 < 1$, intensidade $A_3 < A_2$. Padrão de distribuição da intensidade (B).



Fonte: Autor.

A necessidade de produção de movimento dos aspersores demanda a instalação de peças sobressalentes nos equipamentos, como engrenagens e motores (DOS SANTOS et al., 2012), incrementando seu peso e dificultando o transporte em áreas de campo, elevando os custos de produção e de utilização, podendo estas peças se tornarem mais um componente alvo de futuras falhas, onde, em ambientes de remotos, se traduz em um contratempo que poderá impedir a utilização do simulador.

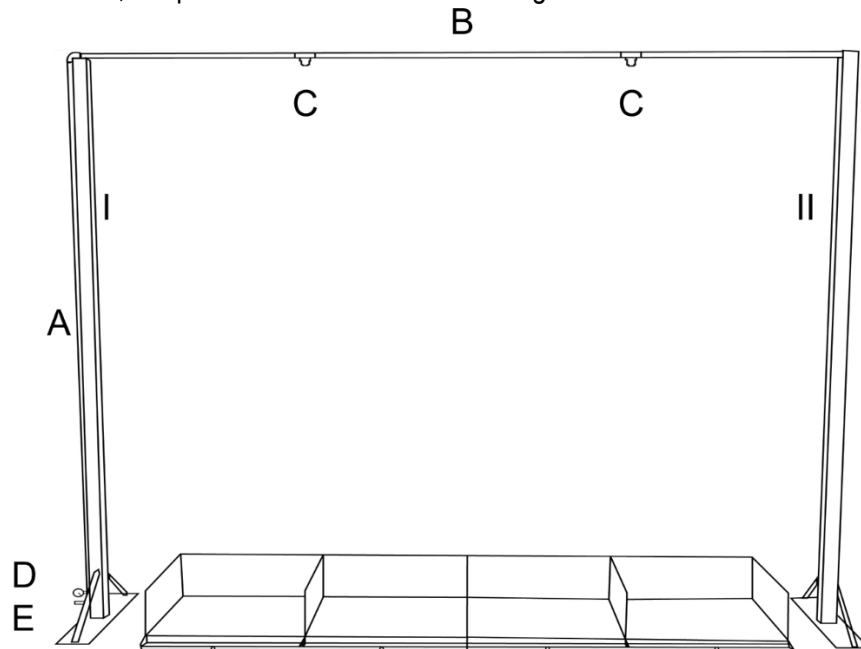
Uma forma de evitar a necessidade do uso de motores perfaz-se na utilização de aspersores estáticos de cone cheio, os quais produzem áreas de distribuição de gotas com padrão circulares ou quadradas. O padrão da distribuição das precipitações depende exclusivamente da dispersão do bico, o qual deve gerar uma área molhada de distribuição semelhante em toda a área do experimento.

Ressalta-se que este modelo de aspersor também apresenta variações de intensidade ao longo de sua área molhada, geralmente variando do centro às bordas (GRISMER, 2011, CONFESSOR, 2019), sendo esta variação alterada de acordo com a pressão de funcionamento, altura e quantidade de bicos utilizados, havendo a necessidade da aferição da distribuição para averiguar se a homogeneidade produzida está de acordo com as regras básicas de uso.

Através deste sistema diferentes simuladores foram desenvolvidos, recobrando áreas que variam de 0,7 m² a mais de 50 m² (LUK et al., 1986; TOSSELL et al., 1987; CERDÁ et al., 1997; ESTEVES et al. 2000; ALVES SOBRINHO et al., 2002; THOMAZ, 2009; e XU et al., 2012; CONFESSOR, 2019; PESSOTI et al., 2020, ANTONELI et al., 2021; CONFESSOR et al., 2022) (FIGURA 12).

Por apresentarem menor quantidade de peças moveis, estes equipamentos se tornam mais simples, robustos, de montagem facilitada e de maior confiabilidade de utilização em ambientes de campo (RIES et al. 2009; RIES 2010), tornando-se ferramentas com maior aceitação de usos em pesquisas de cunho hidrogeomorfológico, visto que, além de replicar de maneira mais fidedigna os processos naturais de forma artificial, também exibem maior confiabilidade e facilidade de uso.

Figura 14: modelo de simulador de chuvas composto de 2 bicos de aspersão estáticos do tipo cone cheio, os quais recobrem de forma homogênea uma área de 4 m².



Fonte: Confessor (2019).

Mesmo que não substituindo o levantamento de dados oriundos de chuvas naturais, o uso de simuladores de chuvas permitiram a execução de diversos estudos, sejam estes erosivos, hídricos, hidrogeomorfológicos, ambientais e de educação (CAPECHE, 2009; DUNKERLEY, 2021; RICKS et al., 2021; KAVIAN et al., 2019; CONFESSOR et. al., 2022; MANNING et al., 2023; CONFESSOR, 2023), contribuindo para o incremento da base de dados científica, divulgação do conhecimento e compreensão de objetos de estudo, tornando-se ferramentas versáteis e de importância para ciência.

Neste sentido, os diferentes tipos de simuladores de chuvas expressos na literatura apresentam potencialidades e restrições de uso, cada qual desenvolvido de maneira a sanar as especificidades de cada pesquisa. Sendo assim, seus usuários devem atentar-se às suas características, de modo a serem evidenciadas nos estudos, gerando dados mais condizentes com a realidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se como são variados os modos de obtenção da chuva simulada, abrangendo uma gama de sistemas que exibem formas de funcionamento que se diferem entre si, expondo recursos distintos que visam replicar situações naturais artificialmente da maneira mais real possível.

De acordo com as características de cada equipamento, vantagens e desvantagens de uso são expressas, devendo o pesquisador ter seu conhecimento prévio para que a condução dos estudos as considere, apresentando dados de maior confiabilidade e com as ressalvas necessárias, sendo os equipamentos caracterizados pela convergência dos parâmetros científicos e de uso.

Apesar de não substituir o processo de aquisição de dados oriundos de chuvas naturais, o desenvolvimento e uso de simuladores de chuvas viabilizou e ainda viabiliza a produção mais acelerada de dados, permitindo seu uso em diferentes tipos de pesquisas, possibilitando a compreensão dos processos que envolvem a dinâmica da água, tornando-se relevantes para a produção e disseminação do conhecimento.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. Ateliê Editorial, 2003.
- ABUDI, I.; CARMI, G.; BERLINER, P. Rainfall simulator for field runoff studies. **Journal of Hydrology**, v. 454–455, p. 76–81, 6 ago. 2012. doi: [10.1016/j.jhydrol.2012.05.056](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.056)
- ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P. A.; PRUSKI, F. 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>
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D. DA; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. DE. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 124–130, abr. 2001. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000100023>
- ANTONELI, V.; CAROLINE, P. E.; ANÉSIO B, J.; RODRIGO-C, J.; CERDÀ, A.; PULIDO, M. Soil and water losses along the cultivation cycle of onion in Irati, Brazil. **CATENA**, v. 204, p. 105439, set. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105439>
- ARTUR, G; OLIVEIRA, P; COSTA, G; ROMERO, E; SILVA, C; FERREIRA, O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18(2), 141–149, 2014. doi:[10.1590/s1415-43662014000200003](https://doi.org/10.1590/s1415-43662014000200003)
- ATLAS, D.; ULBRICH, C. W.; MARKS, F. D.; AMITAI, E.; WILLIAMS, C. R. Systematic variation of drop size and radar-rainfall relations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D6, p. 6155–6169, 27 mar. 1999. <https://doi.org/10.1029/1998JD200098>
- BATTANY, M. C.; GRISMER, M. E. Development of a portable field rainfall simulator for use in hillside vineyard runoff and erosion studies. **Hydrological Processes**, v. 14, n. 6, p. 1119–1129, 30 abr. 2000. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(20000430\)14:6%3C1119::AID-HYP8%3E3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(20000430)14:6%3C1119::AID-HYP8%3E3.0.CO;2-O)
- BAYER, T.; CABEZAS-GUERRERO, M. F.; GADANHA JUNIOR, C. D.; LOECK, A. E. Systems and rates of aerial application of fungicides in irrigated rice. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 143–147, fev. 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p143-147>
- BEARD, K. V. Terminal Velocity and Shape of Cloud and Precipitation Drops Aloft. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 33, n. 5, p. 851–864, maio 1976. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1976\)033%3C0851:TVASOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033%3C0851:TVASOC%3E2.0.CO;2)
- 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>
- BERTRAND, G. Paysage et géographie physique globale: esquisse méthodologique. **Revue géographique des Pyrénées et sud-ouest**, v. 39, n. 3, p. 249–272, 1968.

- BISAL, F. The Effects of Raindrop Size and Impact Velocity on Sand Splash. *Canadian Journal of Soil Science*, 40, 242-245, 1960.
<http://dx.doi.org/10.4141/cjss60-030>
- BISAL, F. THE EFFECT OF RAINDROP SIZE AND IMPACT VELOCITY ON SAND-SPLASH. *Canadian Journal Of Soil Science*, [S.L.], v. 40, n. 2, p. 242-245, 1 ago. 1960. <http://dx.doi.org/10.4141/cjss60-030>
- BLANQUIES, J.; SCHARFF, M.; HALLOCK, B. **The design and construction of a rainfall simulator** 34th Annual conference and Expo. *Anais...Las Vegas, Nevada*: 2003.
- BOWYER-BOWER, T. A. S.; BURT, T. P. Rainfall simulators for investigating soil response to rainfall. *Soil Technology*, v. 2, n. 1, p. 1–16, mar. 1989. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(89\)80002-9](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(89)80002-9)
- CAPECHE, C. Confecção de um simulador de erosão portátil para fins de educação ambiental. Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 31 p. - (Embrapa Solos, Documento 116. ISSN 1517-2627).
- CERDÀ ARTEMI. Simuladores de lluvia y su aplicación a la Geomorfología. *Cuadernos de investigación geográfica / Geographical Research Letters*, v. 25, p. 45–84, 1999.
- CERDÀ, A. Rainfall drop size distribution in the Western Mediterranean basin, València, Spain. *CATENA*, v. 30, n. 2–3, p. 169–182, ago. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(97\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(97)00019-2)
- CHAPLIN, M. Water: its importance to life. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, v. 29, n. 2, p. 54–59, mar. 2001. <https://doi.org/10.1111/j.1539-3429.2001.tb00070.x>
- CHOW, T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- CHRISTIANSEN, J.P. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, Agricultural Experiment Station, Bulletin n. 670, 124p., 1942.
- CLARKE, M. A.; WALSH, R. P. D. A portable rainfall simulator for field assessment of splash and slopewash in remote locations. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 32, n. 13, p. 2052–2069, nov. 2007.
<https://doi.org/10.1002/esp.1526>
- COMINO, J.; KEESSTRA, S.; CERDÀ, A. Soil Erosion as an Environmental Concern in Vineyards: The Case Study of Celler del Roure, Eastern Spain, by Means of Rainfall Simulation Experiments. *Beverages*, 4, 31, 2018.
<https://doi.org/10.3390/beverages4020031>
- CONFESSOR, J. E. G.; RODRIGUES, S. C. Método para calibração, validação e utilização de simuladores de chuvas aplicados a estudos hidrogeomorfológicos em parcelas de erosão. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 1, p. 221–229, 1 jan. 2018. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i1.1294>
- CONFESSOR, J. G. **Avaliação de processos erosivos hídricos em diferentes usos agrícolas, utilizando simulador de chuvas no ambiente de Cerrado**. Dissertação (Mestrado), Uberlândia, 2019. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.606>
- CONFESSOR, J. G.. **Dinâmica hidrogeomorfológica de vertentes do Chapadão do Diamante - Serra da Canastra – MG**. 2023. 231 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.
<http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.70>
- CONFESSOR, J. G.; CARVALHO, F.; RODRIGUES, S. C. Desenvolvimento, calibração e validação de um simulador de chuvas aplicado a estudos hidrogeomorfológicos. *GEOGRAFIA (Londrina)*, v. 31, n. 2, p. 233, 2022.
<https://doi.org/10.5433/2447-1747.2022v31n2p233>
- CONFESSOR, J. G.; SILVA, L. L.; RODRIGUES, S. C. Construction of a mobile rain simulator as a tool for the dissemination of geomorphological education and preservation of environments. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 4, p. 1001–1009, 2021. <https://doi.org/10.5902/2236499468972>
- COUTINHO, A. M.; PEREIRA TOMÁS, 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)
- CUNHA, J. P. A. R. DA; TEIXEIRA, M. M.; VIEIRA, R. F. Avaliação de pontas de pulverização hidráulicas na aplicação de fungicida em feijoeiro. *Ciência Rural*, v. 35, n. 5, p. 1069–1074, out. 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782005000500013>

- CUNHA, J; TEIXEIRA, M; VIEIRA, R; FERNANDES, H. Espectro de gotas de bicos de pulverização hidráulicos de jato plano e de jato cônico vazio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 39, n. 10, p. 977-985, out. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2004001000005>
- DUNKERLEY, D.. The importance of incorporating rain intensity profiles in rainfall simulation studies of infiltration, runoff production, soil erosion, and related landsurface processes. **Journal of Hydrology**, 603, 126834, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126834>
- DUNKERLY, D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. **Hydrological Processes**, 2008. <https://doi.org/10.1002/hyp.7045>
- EHLERS, W.; GOSS, M. Water dynamics in plant production. 2nd. ed. London: CABI, 2016.
- EPEMA, G. F., RIEZEBOS, H.. Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. *Catena. Supplement (Giessen)*, (4), p. 1–18, 1983.
- ESTEVEZ MICHEL; PLANCHON OLIVIER; LAPETITE JEAN MARC; SILVERA NORBERT; CADET PATRICE. The `emire' large rainfall simulator: design and field testing. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 25, p. 681–690, 2000. Doi: [10.1002/1096-9837\(200007\)25:73.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200007)25:73.0.CO;2-8)
- FANG, Q; ZHAO, L; HOU, R; FAN, C; ZHANG, J. Rainwater transformation to runoff and soil loss at the surface and belowground on soil-mantled karst slopes under rainfall simulation experiments. **Catena**, v. 215, p. 106316, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2022.106316>
- FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J.; BARAHONA, E.; MINGORANCE, M.D. Measurement of Infiltration in Small Field Plots by a Portable Rainfall Simulator: Application to Trace-Element Mobility. **Water Air Soil Pollut**, 257–264, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9622-2>
- FERNÁNDEZ-RAGA, M.; RODRÍGUEZ, I.; CALDEVILLA, P.; BÚRDALO, G.; ORTIZ, A.; MARTÍNEZ-GARCÍA, R. Optimization of a Laboratory Rainfall Simulator to Be Representative of Natural Rainfall. **Water**, 14, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14233831>
- GAO, P.; WANG, J.; GAO, Y.; LIU, J.; HUA, D. Observation on the Droplet Ranging from 2 to 16 µm in Cloud Droplet Size Distribution Based on Digital Holography. **Remote Sens**. V.14, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14102414>
- GHADIR, H.; PAYNE, D. The formation and characteristics of splash following raindrop impact on soil. **Journal of Soil Science**, v. 39, n. 4, p. 563–575, dez. 1988. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1988.tb01240.x>
- GONÇALVES, F. L. T.; MASSAMBANI, O. Uma análise do coeficiente de remoção de poluentes em função do espectro de gotas de chuva em diferentes localidades no Brasil e Alemanha. **Química Nova**, v. 33, n. 5, p. 1027–1033, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000500004>
- GRISMER, M.E. Rainfall Simulation Studies—A Review of Designs, Performance and Erosion Measurement Variability. 2011.
- GUERRA, A. J. T. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. **Geography Department, University of Sao Paulo**, p. 32–37, 2005. <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0003>
- HALL, M. J. A Critique of Methods of Simulating Rainfall. **Water Resources Research**, v. 6, n. 4, p. 1104–1114, ago. 1970. <https://doi.org/10.1029/WR006i004p01104>
- HIGNETT, C. T.; GUSLI, S.; CASS, A.; BESZ, W. An automated laboratory rainfall simulation system with controlled rainfall intensity, raindrop energy and soil drainage. **Soil Technology**, v. 8, n. 1, p. 31–42, jul. 1995. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(95\)00004-2](https://doi.org/10.1016/0933-3630(95)00004-2)
- HUDSON, N. Raindrop size distribution in high intensity storms. **Rhodesian Journal of Agricultural Research**, v. 1, n. 1, p. 6–11, 1963.
- HUDSON, N.W. **Soil conservation**. 3. ed. New York, Cornell University Press, p.392, 1995.
- J. B. HUMPHRY; T. C. DANIEL; D. R. EDWARDS; A. N. Sharpley. A portable rainfall simulator for plot scale runoff studies. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 18, n. 2, 2002. <https://doi.org/10.13031/2013.7789>

- JAUQUETH, A. L.; MARSHALL, M. M.; CIAMPAGLIO, C. N. Design of a rainfall simulator for classroom demonstration and field research. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 6(2), 2023. <https://doi.org/10.1002/agg2.20383>
- JOY, S R.; BARTELT-HUNT, S L.; SNOW, D D.; GILLEY, J E.; WOODBURY, B L.; PARKER, D B.; MARX, D B.; LI, X. Fate and Transport of Antimicrobials and Antimicrobial Resistance Genes in Soil and Runoff Following Land Application of Swine Manure Slurry. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 21, p. 12081-12088, 14 out. 2013. <http://dx.doi.org/10.1021/es4026358>
- KAVIAN, A., MOHAMMADI, M., CERDÀ, A., FALLAH, M., & GHOLAMI, L. Calibration of the SARI portable rainfall simulator for field and laboratory experiments. *Hydrological Sciences Journal*, 64(3), 350-360, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1581364>
- KAVKA, P.; NEUMANN, M. Swinging-Pulse Sprinkling Head for Rain Simulators. *Hydrology*, 8, 74, 2021. <https://doi.org/10.3390/hydrology8020074>
- KIM, H.-J.; JUNG, W.; SUH, S.-H.; LEE, D.-I.; YOU, C.-H. The Characteristics of Raindrop Size Distribution at Windward and Leeward Side over Mountain Area. *Remote Sens*. V.14, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14102419>
- KINNELL, P. Sediment transport by shallow flows impacted by pulsed artificial rainfall. *Soil Research*, v. 31, n. 2, p. 199, 1993. <https://doi.org/10.1071/SR9930199>
- KINNELL, P.I.A.. A review of the design and operation of runoff and soil loss plots. *Catena*, v. 145, p. 257-265, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.013>
- KLEIJN, W. B.; OSTER, J. D.; COOK, N. A Rainfall Simulator with Nonrepetitious Movement of Drop Outlets. *Soil Science Society of America Journal*, v. 43, n. 6, p. 1248–1251, nov. 1979. <https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300060040x>
- KUMAR, A.; SINGH, R.; CHANDRA, R.; BHARALI, M. A.. Development of a rainfall simulation system using hypodermic needles. *Indian J. Soil*. v.32(3), 198-205, 2004.
- LAWS, J. O.; PARSONS, D. A. The relation of raindrop-size to intensity. *Transactions, American Geophysical Union*, v. 24, n. 2, p. 452, 1943. <https://doi.org/10.1029/TR024i002p00452>
- LEPSCH, I. F. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- LUK, S. H.; ABRAHMNS, A. D.; PARSONS, A. J. Methodology: A Simple Rainfall Simulator And Trickle System For Hydro-Geomorphological Experiments. *Physical Geography*, v. 7, p. 344-356, 1986. <http://dx.doi.org/10.1080/02723646.1986.10642303>
- MADDEN, L. V.; WILSON, L. L.; NTAHIMPERA, N.. Calibration and Evaluation of an Electronic Sensor for Rainfall Kinetic Energy. *Phytopathology*, [S.L.], v. 88, n. 9, p. 950-959, set. 1998. Scientific Societies. <http://dx.doi.org/10.1094/phyto.1998.88.9.950>
- MAMOON, A; JAHAN, S; HE, X; JOERGENSEN, N E.; RAHMAN, A. First flush analysis using a rainfall simulator on a micro catchment in an arid climate. *Science Of The Total Environment*, v. 693, p. 133552, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.358>
- MANNING, C.; FAULKNER, B.; DONALD, W. N.; PEREZ, M. A.. Comparison of Erosion Control Products Using an ASTM D6459 Rainfall Simulator: Insights and Suggestions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 149(8),2023. <https://doi.org/10.1061/JIJDHDH.IRENG-993>
- MELLO, C. R. DE; 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*, v. 22, n. 1, p. 0100–0103, 1979. Doi: [10.13031/2013.34973](https://doi.org/10.13031/2013.34973)
- MILLER, W. P. A Solenoid-Operated, Variable Intensity Rainfall Simulator. *Soil Science Society of America Journal*, v. 51, n. 3, p. 832–834, maio 1987. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100030048x>

- MONTEBELLER, C. A.; CARVALHO, D. F. DE; ALVES SOBRINHO, T.; NUNES, A. C. DA 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>
- MORIN, J.; GOLDBERG, S.; SEGNER, I. A rainfall simulator with a rotating disc. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, v. 10, p. 74–79, 1967. <https://doi.org/10.13031/2013.39599>
- NAVAS, A.; ALBERTO, F.; MACHÍN, J.; GALÁN, A. Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. **Soil Technology**, v. 3, n. 4, p. 385–397, dez. 1990. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(90\)90019-Y](https://doi.org/10.1016/0933-3630(90)90019-Y)
- NGASOH, F.; MBAJIORGU, C.; KAMAI, M.; OKORO, G. A Revisit of Rainfall Simulator as a Potential Tool for Hydrological Research. *Agronometeorology*, 2020. Doi: [10.5772/intechopen.93532](https://doi.org/10.5772/intechopen.93532)
- NISSEN, R.; LIST, R.; HUDAK, D.; MCFARQUHAR, G. M.; LAWSON, R. P.; TUNG, N. P.; SOO, S. K.; KANG, T. S. Constant Raindrop Fall Speed Profiles Derived from Doppler Radar Data Analyses for Steady Nonconvective Precipitation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 62, n. 1, p. 220–230, 1 jan. 2005. <https://doi.org/10.1175/JAS-3369.1>
- OKI, T. The global water cycle. In: **Global Energy and Water Cycles**. K. and R. Gurney eds, Cambridge University, p. 10–27, 1999.
- PAIGE, G. B.; J. J. STONE; J. R. SMITH; J. R. KENNEDY. The walnut gulch rainfall simulator: a computer-controlled variable intensity rainfall simulator. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 1, p. 25–31, 2004.
- PESSOTI, B. P. L.; SILVEIRA, A.; MOURA, R. B. DE; ISIDORO, J. M. G. P.; TIEZZI, R. DE O.; GONÇALVES, F. A. Transporte de material dissolvido em superfície impermeável sob chuva artificial analisado com a aplicação do delineamento experimental das faces centradas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 97–106, jan. 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020194490>
- PRUPPACHER, H. R.; KLETT, J. D. **Microphysics of Clouds and Precipitation**. New York: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- REGMI, T. P.; THOMPSON, A. L. Rainfall simulator for laboratory studies. **Applied Engineering in Agriculture**, 16(6), 641–647, 2000. Doi: <https://doi.org/10.13031/2013.5380>
- RIBEIRO, B. T. **Energia cinética de gotas de chuva simulada e energia ultra-sônica na desagregação de um cambissolo**. 2006. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- RICKS, M.D.; HORNE, M.A.; FAULKNER, B.; ZECH, W.C.; FANG, X.; DONALD, W.N.; PEREZ, M.A. Design of a Pressurized Rainfall Simulator for Evaluating Performance of Erosion Control Practices. **Water**, 11, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11112386>
- RIES, J. B. Methodologies for soil erosion and land degradation assessment in mediterranean-type ecosystems. **Land Degradation & Development**, v. 21, n. 2, p. 171–187, mar. 2010. <https://doi.org/10.1002/ldr.943>
- 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 and Tillage Research**, v. 106, n. 1, p. 109–116, dez. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.07.005>
- ROBINSON, D. A.; NAGHIZADEH, R. The impact of cultivation practice and wheelings on runoff generation and soil erosion on the South Downs: some experimental results using simulated rainfall. **Soil Use and Management**, v. 8, n. 4, p. 151–156, dez. 1992. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1992.tb00913.x>
- RONČEVIĆ, V.; ŽIVANOVIĆ, N.; VAN BOXEL, J.H.; ISERLOH, T.; ŠTRBAC, S. Dripping Rainfall Simulators for Soil Research—Performance Review. **Water**, 15, 1314, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15071314>
- ROTH, C. H.; HELMING, K. Dynamics of surface sealing, runoff formation and interrill soil loss as related to rainfall intensity, microrelief and slope. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 155, n. 3, p. 209–216, 12 jan. 1992. <https://doi.org/10.1002/jpln.19921550309>
- SANTOS, J; SANTOS, C; SILVA, R. Perdas de Água e Solo Utilizando Chuva Simulada em Diferentes Coberturas Superficiais e Condições de Umidade no Semiárido Paraibano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v. 17, n. 4, p. 217–228, 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v17n4.p217-228>

- SAUVAGEOT, H.; KOFFI, M. Multimodal Raindrop Size Distributions. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 57, n. 15, p. 2480–2492, ago. 2000. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057%3C2480:MRSD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057%3C2480:MRSD%3E2.0.CO;2)
- SOTCHAVA, V. B. Por uma teoria de classificação de geossistemas da vida terrestre. **Biogeografia. São Paulo, Instituto de Geografia USP.**, v. 14, p. 23, 1978.
- SPOHR, R.; CORCINI, A.; PELLEGRIN, J.; BONFANTI, J.; SOTO, M.; CARDOSO, T. Desenvolvimento e validação de um simulador de chuvas portátil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, p. 411–417, 2015. Doi: [10.21168/rbrh.v20n2.p411-417](https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n2.p411-417)
- STAŠEK, J.; KRÁSA, J.; MISTR, M.; DOSTÁL, T.; DEVÁTÝ, J.; STŘEDA, T.; MIKULKA, J. Using a Rainfall Simulator to Define the Effect of Soil Conservation Techniques on Soil Loss and Water Retention. **Land**, 12, 431, 2023. <https://doi.org/10.3390/land12020431>
- THOMAZ, E. L. The influence of traditional steep land agricultural practices on runoff and soil loss. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 130, n. 1–2, p. 23–30, 1 mar. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.11.009>
- TOSELL, R. W.; DICKINSON, W. T.; RUDRA, R. P.; WALL, G. J. A portable rainfall simulator. Canadian Agricultural Engineering, Guelph. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 29, n. 2, p. 155–162, 1987.
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Superintendência de Recursos Naturais e Meio ambiente. Diretoria Técnica. , 1977.
- VISSOTTO, F. Z.; MONTENEGRO, F. M.; SANTOS, J. M. DOS; OLIVEIRA, S. J. R. DE. Avaliação da influência dos processos de lecitinação e de aglomeração nas propriedades físicas de achocolatado em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 3, p. 666–671, set. 2006. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000300028>
- WANG, S; FU, Z; CHEN, H; NIE, Y; XU, Q. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: implications of rainfall simulation experiments on karst slope. **Journal Of Hydrology**, v. 580, p. 124370, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124370>
- WEN, S; WANG, J; LI, Y; SHAO, M. Effects of anecic earthworms on runoff and erosion on the slope with soil from the Loess Plateau under a rainfall simulation experiment. **Agricultural Water Management**, v. 259, p. 107230, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107230>
- WESTALL, F.; BRACK, A.. The Importance of Water for Life. *Space Science Reviews*, 214, 50, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0476-7>
- WOOD, W. W. Role of Ground Water in Geomorphology, Geology, and Paleoclimate of the Southern High Plains, USA. **Ground Water**, v. 40, n. 4, p. 438–447, jul. 2002. Doi: [10.1111/j.1745-6584.2002.tb02522.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2002.tb02522.x)
- XU, XIANGZHOU; ZHU, TONGXIN; ZHANG, HONGWU; GAO, LU. A Conventional Experimental Technique: rainfall simulation. **Experimental Erosion**, p. 29-43, 2020. Springer Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-3801-8_3
- ZAMBON, N.; JOHANNSEN, L.; STRAUSS, P; DOSTAL, T; ZUMR, D; COCHRANE, T A.; KLIK, A. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. **Catena**, v. 196, p. 104827, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2020.104827>