

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

TESE

**Erosão Hídrica sob Chuva Simulada Com Variação
Instantânea de Intensidade de Precipitação e
Avaliação Automática da Enxurrada**

Pietro Menezes Sanchez Macedo

2022



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA -
CIÊNCIA DO SOLO**

**EROSÃO HÍDRICA SOB CHUVA SIMULADA COM VARIAÇÃO
INSTANTÂNEA DE INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO E
AVALIAÇÃO AUTOMÁTICA DA ENXURRADA**

PIETRO MENEZES SANCHEZ MACEDO

Sob orientação do Professor
Daniel Fonseca de Carvalho

e Coorientação dos Professores
Nivaldo Shultz
Marinaldo Ferreira Pinto

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Doutor**, no
Programa de Pós-Graduação em
Agronomia, Área de concentração em
Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

Seropédica, RJ
Fevereiro, 2022

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M431e Macedo, Pietro Menezes Sanchez, 1990-
Erosão hídrica sob chuva simulada com variação instantânea de intensidade de precipitação e avaliação automática da enxurrada / Pietro Menezes Sanchez Macedo. – Seropédica, 2022.
70 f. : il.

Orientador: Daniel Fonseca de Carvalho.
Tese (Doutorado). – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,
Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2022.

1. Simulador de chuva. 2. Arduino. 3. Padrões de precipitação. 4. Coletor de enxurrada. I. Carvalho, Daniel Fonseca de, 1968-, orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo III. Título.

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

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-CIÊNCIA DO SOLO

PIETRO MENEZES SANCHEZ MACEDO

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Qualidade do Solo e Manejo Ambiental.

TESE APROVADA EM 23/02/2022.

Daniel Fonseca de Carvalho. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Marcos Gervásio Pereira. Dr. UFRRJ

Conan Ayade Salvador. Dr. UFRRJ

Elói Panachuki. Dr. UEMS

Paulo Tarso Sanches de Oliveira. Dr. UFMS

DEDICATÓRIA

Dedico a todos aqueles que buscam um significado profundo nas pequenas coisas do dia a dia e quem respeita a obra daqueles que se engajaram em lapidar a beleza que existe em tudo.

Dedico também à natureza e a obra divina cuja inspiração me permitiu vislumbrar seu esplendor e fazer parte da engrenagem do firmamento como uma peça tão importante quanto qualquer outra em um relógio que faz o tempo fluir em um universo vasto. Por fim e não menos importante dedico à jornada que me possibilitou compreender o significado de minhas buscas filosóficas a respeito das palavras, em especial existência, maestria.

Sobre a jornada, a metáfora de ser como uma espada se aplica, cujas dificuldades e desafios de cada dia nos molda como marretadas sobre uma bigorna, dando forma a nosso caráter e criando a consciência de uma mente compartilhada com aqueles que nos cercam, espalhando faíscas errantes de palavras, pensamentos e sentimentos que iluminam tudo ao redor por breves momentos. Como a tempera de uma lâmina a jornada em Seropédica nos submete a dias de calor extenuante com temperaturas acima de 40°C e o frio de um inverno congelante que durante infimas madrugadas já atingiu temperaturas de 8°C tornando-nos mais duros e resistentes a medida que sobrevivemos as adversidades. Como normalização do aço em nossa estrutura de carbono e ferro as tempestades que passamos mediante aos desafios de desenvolver uma Tese com um simulador de chuva que nos faz mais flexíveis e resilientes. E por fim o polimento e a afiação que promove significado aos conceitos de existência e maestria.

AGRADECIMENTOS

Hoje 23 de fevereiro de 2022 completo um ciclo que comecei no primeiro dia da prova do vestibular para engenharia agrônômica em 23 de novembro de 2008 e na primeira vez nessa vida que pisei e me apaixonei pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Por tudo que vivi aqui nesses anos ofereço meus sentimentos de gratidão. Agradeço a minha família em especial a Camilla Dominguez Lima e a meus pais e avós que me apoiaram nessa árdua empreitada. Agradeço a sorte que tive por vivenciar cada segundo tanto bons quanto ruins que fazem parte de quem sou, de quem fui e de quem serei. Agradeço a natureza, que me permitiu estudá-la e a chuva que traz a vida à terra e que tive a permissão e missão de simular. Agradeço a instituição (UFRRJ), ao programa de pós-graduação (PPGA-CS) e aos órgãos que financiaram minha bolsa e projeto (CAPES e Cnpq). Agradeço a todos que me auxiliaram durante o projeto em especial aos bolsistas de iniciação científica Thiago Altamir Rodrigues Coutinho e Bruno Antonio Augusto Faria Conforto, além de todos aqueles que fizeram parte principalmente das expedições à campo para gerar os dados de erosão a partir do simulador de chuva. Por fim, agradeço a você leitor que está absorvendo um pouco de mim ao ler essas palavras e transformando meu conhecimento em seu, conferindo um significado especial ao título que aqui recebo (cuja etimologia Doutor que provem de *Doctor* do Latim, se refere a “Aquele que ensina”).

Minha Gratidão.

BIOGRAFIA

PIETRO MENEZES SANCHEZ MACEDO, filho de Vincenzo Mairota Sanchez Macedo e Patrícia Maria Menezes Sanchez, nasceu em 24 de novembro de 1990 na cidade e estado do Rio de Janeiro. Morou até seus 18 anos na Ilha do Governador – RJ. Alfabetizado por sua Avó paterna Lourdes Sanchez Macedo, ingressou na escola aos quatro anos no colégio São Miguel Arcanjo aonde fez o ensino básico até o CA. Foi transferido para o Colégio Cenequista Capitão Lemos Cunha aonde cursou o ensino Fundamental e o Ensino médio Completo patrocinado pela Avó materna Auriene Alves de Menezes Marçal. Foi instruído nas artes musicais pelo Conservatório da Ilha do Governador aonde por três anos estudou o violino, teoria musical e percussão. Cursou desenho artístico por três anos em projeto extraclasse durante o fundamental. E completou curso técnico em Dotnet pela Microcamp Ilha do Governador. Ao completar 19 anos se mudou para Seropédia – RJ ao passar para o curso de Engenharia Agrônômica na UFRRJ durante o qual foi bolsista de iniciação científica por dois anos no laboratório de melhoramento vegetal no Instituto de Biologia da UFRRJ orientado pelo professor Maurício Ballesteiro Pereira. Posterior foi monitor da disciplina de Melhoramento Vegetal durante um ano. Acompanhou o desenvolvimento da empresa júnior de agronomia Rural Consultoria e participou do Projeto de Equoterapia da UFRRJ. Concluiu a Graduação em 2014 adentrando logo em seguida no Mestrado pelo PPGA-CS da UFRRJ com projeto voltado para o sensoriamento remoto cuja dissertação intitulada Ajuste no Fator C da RUSLE e Avaliação Temporal da Cobertura e Perda de Solo Estimada na Bacia Hidrográfica de Palmares-Ribeirão do Saco/RJ foi orientada pelo Prof. Daniel Fonseca de Carvalho e co-orientado pelo Prof. Mauro Antônio Homem Antunes. Defendeu e obteve o título de Mestre em Ciências (Agronomia-Ciência do Solo) após defender em agosto de 2016. Entrou para o Doutorado (PPGA-CS/UFRRJ) no terceiro semestre de 2017 aonde desenvolveu a Tese intitulada Erosão Hídrica Sob Chuva Simulada com Variação Instantânea de Intensidade de Precipitação e Avaliação Automática da Enxurrada sob orientação do Prof. Daniel Fonseca de Carvalho e co-orientação dos Profs. Nivaldo Shultz e Marinal Ferreira Pinto. Com o advento da pandemia de COVID-19 a defesa do doutorado foi prorrogada para fevereiro de 2022 quando a presente Tese será apresentada para avaliação da banca de doutores selecionados para contribuir com o material científico produzido.

RESUMO GERAL

MACEDO, Pietro Menezes Sanchez. **Erosão hídrica sob chuva simulada com variação instantânea de intensidade de precipitação e avaliação automática da enxurrada.** 2022. 70f. Tese (Doutorado em Agronomia-Ciências do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

A erosão hídrica é um fenômeno natural de grande importância no cenário global no que diz respeito à conservação e exploração sustentável do solo e da água, e o uso de simuladores de chuvas tem gerado inúmeras informações relevantes para a compreensão desse tema. O aprimoramento desses equipamentos visando a aplicação de chuvas com variação de intensidade de precipitação e o desenvolvimento de um coletor eletrônico de enxurrada são etapas cruciais no estudo dos processos erosivos. Partindo do pressuposto que variar a rotação do simulador de chuvas possibilitaria o controle das intensidades de precipitação aplicadas durante as simulações e que um coletor automático de enxurrada facilitaria a obtenção de dados em campo desenvolvemos a tese em três capítulos de maneira a abordar todo o procedimento adotado no desenvolvimento e avaliação dos dispositivos associados ao simulador de chuvas *InfiAsper*. O objetivo do primeiro capítulo foi avaliar se a variação na rotação do disco obturador, associada à sua abertura, possibilita a obtenção de diferentes padrões de chuva no simulador de chuva *InfiAsper*. A instalação de componentes eletrônicos no painel de controle do simulador permitiu a variação da rotação do obturador durante sua operação de acordo com programação prévia, possibilitando a simulação de chuvas com diferentes padrões de precipitação. Eventos com picos de intensidade de precipitação (IP) de 110 mm h^{-1} e duração de 40 min foram adequadamente simuladas pelo equipamento, com uniformidade de aplicação acima de 75%. Com esse dispositivo tornou-se possível simular outros padrões de chuva, com IP e duração diferentes, alterando as configurações para o ensaio desejado. O segundo capítulo teve como objetivo avaliar a operacionalidade do simulador de chuva *InfiAsper* com o novo painel de controle que varia a intensidade de precipitação durante a aplicação da chuva e as perdas de solo e água associadas a diferentes padrões de chuva em um Argissolo Distrófico com textura franco-argilosa. O painel foi programado para simular chuvas de 40 min de duração e lâmina total de 30 mm em um terreno com declividade de $0,09 \text{ m m}^{-1}$, gradeado no sentido da curva de nível e em condição de solo exposto. Operando com o novo painel de controle, o *InfiAsper* funcionou satisfatoriamente permitindo variar a intensidade das chuvas, conforme as características das chuvas esperadas nos eventos naturais. Padrões de chuvas intermediário e atrasado produziram maiores perdas de solo e água do que o padrão avançado. Os padrões de chuva intermediário invertido e constante não produziram perdas significativas para a aplicação de lâmina d'água média de 30 mm. No terceiro capítulo é apresentado o desenvolvimento e a avaliação em campo de um coletor de dados para simuladores de chuva, capaz de quantificar o volume de enxurrada e estimar a taxa de perda de solo automaticamente. Utilizando um microcontrolador (Arduino Mega® 2560), foram testados sensores com princípios capacitivo, ultrassônico e por pressão, para computar o volume de enxurrada, e um turbidímetro, para computar as taxas de perda de solo. Os sensores foram selecionados quanto à calibração e incerteza dos dados. O coletor automático de enxurrada equipado com o transdutor de pressão PSI.420 e o sensor de turbidez ST100 se mostrou eficaz na obtenção e armazenamento de dados de volume de enxurrada e perda de solo obtidos durante ensaio de chuva simulada em campo.

Palavras-chave: Simulador de chuva. Arduino. Padrões de precipitação. Coletor de enxurrada.

GENERAL ABSTRACT

MACEDO, Pietro Menezes Sanchez. **Water erosion under simulated rainfall with instantaneous variation of precipitation intensity and automatic runoff assessment.** 2022. 70p. Thesis (Doctor in Agronomy-Soil Science). Institute of Agronomy, Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

Water erosion is a natural phenomenon of great importance in the global scenario with regard to the conservation and sustainable exploration of soil and water, and the use of rainfall simulators has generated a lot of relevant information for the understanding of this topic. The improvement of these equipments aiming at the application of rains with variation of precipitation intensity and the development of an electronic runoff collector are crucial steps in the study of erosive processes. Assuming that changing the rotation of the rainfall simulator would make it possible to control the precipitation intensities applied during the simulations and that an automatic runoff collector would facilitate the collection of data in the field, we developed the thesis in three chapters in order to approach the entire procedure adopted in the development and evaluation of devices associated with the InfiAsper rainfall simulator. The aim of the first chapter was to evaluate whether the variation in the shutter disc rotation, associated with its aperture, makes it possible to obtain different rainfall patterns in the InfiAsper rainfall simulator. The installation of electronic components in the simulator's control panel allowed the variation of the shutter rotation during its operation according to previous programming, allowing the simulation of rains with different precipitation patterns. Events with peak precipitation intensity (PI) of 110 mm h⁻¹ and duration of 40 min were adequately simulated by the equipment, with application uniformity above 75%. With this device it became possible to simulate other rain patterns, with different PI and duration, changing the settings for the desired test. The second chapter aimed to evaluate the operability of the InfiAsper rainfall simulator with the new control panel that varies the intensity of precipitation during the application of rain and the soil and water losses associated with different rainfall patterns in a Dystrophic Acrisol with texture clay loam. The panel was programmed to simulate rainfall of 40 min duration and a total depth of 30 mm in a terrain with a slope of 0,09 m m⁻¹, graded in the direction of the contour and in an exposed soil condition. Operating with the new control panel, InfiAsper worked satisfactorily, allowing to vary the intensity of the rains, according to the characteristics of the rains expected in natural events. Intermediate and late rainfall patterns produced greater soil and water losses than the advanced pattern. The intermediate inverted and constant rainfall patterns didn't produce significant losses for the application of an average water depth of 30 mm. The third chapter presents the development and field evaluation of a data collector for rainfall simulators, capable of quantifying runoff volume and automatically estimating the rate of soil loss. Using a microcontroller (Arduino Mega® 2560), sensors with capacitive, ultrasonic and pressure principles were tested to compute runoff volume, and a turbidimeter to compute soil loss rates. Sensors were selected for calibration and data uncertainty. The automatic runoff collector equipped with the PSI.420 pressure transducer and the ST100 turbidity sensor proved to be effective in obtaining and storing data on runoff volume and soil loss obtained during a simulated rain test in the field.

Keywords: Rainfall simulator. Arduino. Precipitation patterns. Flood collector.

LISTA DE FIGURAS

Figure 1. Scheme of the components of the <i>InfiAsper</i> rainfall simulator (Legend: metallic structure (1); water application unit (2); control panel (3); reservoir and water pump (4); and runoff collector (5)).....	8
Figure 2. <i>InfiAsper</i> rainfall simulator (a), shutter discs for regulating precipitation intensity (b) and control panel (c).	9
Figure 3. Electrical scheme of the original panel with the addition of the potentiometer for controlling the rotation.	10
Figure 4. Flowchart illustrating the logic used in the programming of the microcontroller which controls the reading of the hydrological patterns. <i>i</i> : index of hydrological patterns; <i>t</i> : test time (min) and line number in the txt file; <i>N</i> : total duration of the test, min; FILE: File to be read on SD card; ADV: advanced; INT: intermediate; DEL: delayed.	12
Figure 5. Calibration curve of the device's rotation according to the precipitation intensity used for constructing hydrological patterns that can be programmed on the panel.	13
Figure 6. Rainfall patterns generated with the calibration of the device programmed for tests with duration of 40 min, maximum PI peaks of 110 mm h ⁻¹ and total depth applied of 30 mm.	13
Figure 7. Accumulated volume versus drop diameter for obtaining D50.	18
Figure 8. Electronic diagram of the new <i>InfiAsper</i> panel.....	19
Figure 9. New control panel of the rainfall simulator <i>InfiAsper</i> : (a) internal components and (b) external interface.....	20
Figure 10. Spatial distribution of PI of the rainfalls applied by <i>InfiAsper</i> ranging from <20 to >50 mm for Advanced (a), Intermediate (b), Delayed (c), Inverted Intermediate (d) and Constant (e) patterns (mm h ⁻¹).	20
Figure 11. Surface runoff (a) and soil loss rates (b) for different simulated rainfalls patterns obtained by new <i>InfiAsper</i>	21
Figure 12. New <i>InfiAsper</i> control panel (a) and applied precipitation patterns (b). Source: Macedo et al. (2021).	32
Figure 13. <i>InfiAsper</i> model rainfall simulator (a) and collector plot (b).	32
Figure 14. Precipitation intensity and average 206 infiltration and surface runoff rates during simulated rainfall with the AD (a), IN (b), and DE (c) patterns.	36
Figure 15. Relative surface runoff (a) and relative soil loss (b) as a function of the relative depth applied in advanced, intermediate, and delayed precipitation patterns.	38
Figure 16. Relative soil loss as a function of relative runoff for advanced, intermediate, and delayed precipitation patterns.	39
Figura 17. Protótipo do coletor automático de enxurrada com suporte de instalação de campo em vista externa (A) e vista interna mostrando o posicionamento dos sensores para mensurar o volume (1B) e a perda de solo (2B).	50
Figura 18. Esquema interno do protótipo, indicando o posicionamento dos sensores, esquema estrutural do coletor e configuração elétrica do painel controlador.	51
Figura 19. Amostras de enxurrada representativas das intensidades de precipitação de 30 (A), 45 (B), 60 (C) e 75 mm h ⁻¹ (D) aplicadas pelo simulador de chuvas em campo.....	52
Figura 20. Fluxograma da programação utilizada no protótipo do coletor de enxurrada para leituras realizadas considerando um volume pré-definido de 200 cm ³	53

Figura 21. Curva de calibração do transdutor de pressão de uso industrial modelo PSI.420 A5 50MBAR 12N.....	56
Figura 22. Volume mensurado em proveta graduada em relação ao volume calculado pela curva de calibração gerada para o sensor de pressão PSI.420 A5 50MBAR 12N.	57
Figura 23. Curvas de calibração para o sensor capacitivo (A) e o sensor de pressão modelo MPX5010Dp (B).	57
Figura 24. Curvas de calibração para o turbidímetro geradas a partir das médias das amostras peneiradas e preparadas em laboratório e obtidas a partir das metodologias SR e CR.	58
Figura 25. Estrutura da parcela coletora (A) e foto da instalação do coletor em campo junto ao simulador <i>InfiAsper</i> (B).	60
Figura 26. Dados de perda de solo obtidos pela metodologia SR e CR a partir da calibração com material peneirado e por coleta de campo.	60
Figura 27. Perda de solo (PS) e volume de enxurrada coletados automaticamente e manualmente aferido em laboratório.	61
Figura 28. Formato do arquivo de programação do padrão Avançado (arquivo AVA.txt). Valores “001” representam o código para finalização da simulação.	69
Figura 29. Formato do arquivo de programação do padrão Intermediário (arquivo INT.txt). Valores “001” representam o código para finalização da simulação.	69
Figura 30. Formato do arquivo de programação do padrão Atrasado (arquivo ATR.txt). Valores “001” representam o código para finalização da simulação.	70
Figura 31. Formato do arquivo de programação do padrão personalizado aonde foi inserido o padrão intermediário invertido (arquivo TEST.txt). Valores “001” representam o código para finalização da simulação.	70

LISTA DE TABELAS

Table 1. Precipitation intensity (PI), water consumption (Cw) and water use efficiency (Ew) for the different openings and rotations of the device.	16
Table 2. CU values and precipitation intensity (PI) for different shutter rotations and operating pressures, for a disc opening of 56 mm.	17
Table 3. Values of rotation, drop diameter (D50), simulated rainfall kinetic energy (KeS) and relationship between simulated/natural kinetic energy (KeS/KeN) for tests with pressure of 27.56 kPa.	19
Table 4. Characteristics of the Distrophic Acrisol with a clay loam texture of the experimental area.	31
Table 5. Mean values and respective standard deviations of the time to start runoff (TSR), the runoff ending time (RET), and the maximum runoff rate (MRR).	34
Table 6. Mean values and respective standard deviations of accumulated soil loss (ASL) and accumulated runoff depth (ARD).	36
Tabela 7. Resultado das incertezas obtidas pelos sensores testados para obter os dados de volume no coletor de enxurrada.	55
Tabela 8. Valores estatísticos do sinal de resposta do turbidímetro a partir dos dados (média de 15 repetições) calibrado pelo método SR.	58
Tabela 9. Valores estatísticos do sinal de resposta do turbidímetro (média de 30 repetições) calibrado a partir do método CR.	59
Tabela 10. Custos dos principais componentes usados e sensores testados para o desenvolvimento do coletor de enxurrada (preços datados de 30/06/2021).	62

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

AD	Advanced
ARD	Accumulated Runoff Depth
ASI	Aggregate Stability Index
ASL	Accumulated Soil Loss
AT	Padrão de Precipitação Atrasado
AV	Padrão de Precipitação Avançado
IN	Padrão de Precipitação Intermediário/ Intermediate
II	Padrão de Precipitação Intermediário Invertido
IP	Intensidade de Precipitação
CA	Consumo de Água
Corg	Carbono Orgânico
CT	Padrão de Precipitação Constante/Constant
CUC/CU	Coefficiente de Uniformidade de Christiansen/Coefficient of Uniformity
CW	Water Consumption
DE	Delayed
DMG	Diâmetro Médio Geométrico
DMP	Diâmetro Médio Ponderado
Dp	Densidade da Partícula
Ds	Densidade do Solo
D50	Diâmetro de 50% das Gotas
EA	Eficiência do Uso da Água
EcN	Energia Cinética Natural
EcS	Energia Cinética Simulada
EW	Efficiency of Water Application
IEA	Índice de Estabilidade dos Agregados
II	Inverted Intermediate
INV	Frequency Inverter
KeN	Kinetic Energy of Natural Rainfall with Equivalent Intensity
KeS	Kinetic Energy of Simulated Rainfall
KI	Contactora Switch
Mac	Macroporosidade
MGD	Mean Geometric Diameter
Mic	Microporosidade
MRR	Maximum Runoff Rate
MWD	Mean Weight Diameter
PI	Precipitation Intensity
Pt	Porosidade Total
PWM	Pulse Width Modulation
P1	Potentiometer
RET	Runoff Ending Time
SD	Soil Density
SOC	Content of Soil Organic Carbon
S1	Consisting of a Switch
S2	Composed of a Switch

TPV	Total Pore Volume
TR1	Thermal Relay
TSR	Time to Start Runoff
UsAs	Umidade do Solo Antes da Simulação
UsDs	Umidade do Solo Depois da Simulação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. CHAPTER I A MODIFIED PORTABLE RAINFALL SIMULATOR FOR SOIL EROSION ASSESSMENT UNDER DIFFERENT RAINFALL PATTERNS	3
2.1 RESUMO.....	4
2.2 ABSTRACT.....	5
2.3 INTRODUCTION	6
2.4 MATERIAL AND METHODS	8
2.5 RESULT AND DISCUSSION	15
2.5.1 Precipitation intensity, water consumption and efficiency	15
2.5.2 Coefficient of uniformity and operating pressure	17
2.5.3 Kinetic energy and drop diameter	18
2.5.4 Development of control panel and evaluation of precipitation patterns	18
2.5.5 Field testing	20
2.6 CONCLUSIONS	22
2.7 REFERENCES	23
3. CHAPTER II SOIL LOSS AND RUNOFF OBTAINED WITH CUSTOMIZED PRECIPITATION PATTERNS SIMULATED BY INFIASPER	27
3.1 RESUMO.....	28
3.2 ABSTRACT.....	29
3.3 INTRODUCTION	30
3.4 MATERIAL AND METHODS	31
3.4.1 Characterization of the experimental área.....	31
3.4.2 Soil erosion evaluation under different precipitation patterns	31
3.4.3 Experimental design and statistical analyses	33
3.5 RESULTS AND DISCUSSION	34
3.5.1 Surface runoff.....	34
3.5.2 Accumulated losses of water and soil	35
3.5.3 Water and soil relative losses as a function of the applied and runoff depths	37
3.6 CONCLUSION.....	40
3.7 REFERENCES	41
4. CAPÍTULO III DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR PARA AVALIAÇÃO AUTOMÁTICA DA ENXURRADA EM ESTUDOS COM CHUVA SIMULADA	46

4.1 RESUMO.....	47
4.2 ABSTRACT.....	48
4.3 INTRODUÇÃO.....	49
4.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
4.4.1 Construção do protótipo.....	50
4.4.2 Avaliação da incerteza de medição e calibração dos sensores.....	51
4.4.3 Protótipo de coletor de enxurrada.....	53
4.4.4 Avaliação em campo e análise de custo-benefício.....	54
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.5.1 Avaliação dos sensores aplicados na determinação de volume.....	55
4.5.2 Calibração do sensor de turbidez.....	57
4.5.3 Avaliação do equipamento em campo.....	59
4.5.4 Análise de custos e viabilidade técnica.....	61
4.6 CONCLUSÕES.....	64
4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
5. CONCLUSÃO GERAL.....	68
6. ANEXOS.....	69

1. INTRODUÇÃO GERAL

A erosão hídrica é um fenômeno natural complexo e um dos principais fatores de degradação dos solos que acarreta grandes prejuízos no setor agrícola em todo planeta. É um processo que tem sido acelerado pela intervenção antrópica em resposta à utilização desordenada dos recursos do solo visando o desenvolvimento da sociedade. O principal prejuízo causado pela erosão é a perda da fertilidade do solo, o que causa diversos outros problemas como o aumento da acidez, a redução da biodiversidade, a desestruturação dos agregados entre outras características que retroalimentam o sistema e favorecem ainda mais a erosão. Outro efeito nocivo da erosão hídrica é o assoreamento e contaminação dos corpos hídricos acumuladores de sedimentos. Portanto, a compreensão dos seus mecanismos naturais é fundamental para o desenvolvimento de um manejo sustentável dos solos no que tange à exploração agrícola, viabilizando a adoção de práticas conservacionistas que, em sua maioria, preconiza o uso de cobertura vegetal e um bom manejo da matéria orgânica como ferramentas para proteger o solo dos efeitos oriundos da erosão.

Considerando a importância do estudo dos mecanismos da erosão, em especial a erosão hídrica que afeta a maior parte das zonas agricultáveis de clima tropical, o uso de ferramentas como simuladores de chuva ganha destaque. Os simuladores de chuva são equipamentos que facilitam a obtenção de informações científicas a respeito da perda de solo à medida que independe de eventos naturais e apresentam controle de boa parte dos processos que envolve a simulação. Desde a década de 30, vários modelos têm sido concebidos e aprimorados visando a aplicação de chuvas com características semelhantes aos eventos naturais. Porém, para que um simulador possa ser devidamente empregado em estudos científicos o mesmo deve apresentar alta uniformidade de aplicação e energia cinética das gotas semelhante à da chuva natural, além de controle da intensidade de precipitação.

Atualmente no meio científico ocorrem debates a respeito de como os picos de intensidade em momentos distintos da precipitação ao longo de um evento (padrões de precipitação) podem influenciar a formação de enxurrada e as taxas de perda de solo. Essa característica das chuvas naturais é muito vezes negligenciada durante a simulação das chuvas, sendo poucos os equipamentos que demonstram agregar esse aspecto à simulação de forma eficiente. Nesse sentido, desenvolver um equipamento que permite personalizar as intensidades de precipitação ao longo da simulação aumentaria o grau de realismo dos dados avaliados.

Dentre os vários modelos de simuladores de chuva existentes, um dos mais utilizado no Brasil em pesquisas é o *InfAsper* com diversas publicações citando seu uso nos últimos anos. Esse equipamento que tradicionalmente simula chuvas com intensidades constantes utiliza dois bicos pulverizadores que aplicam a água pressurizada sobre discos rotativos sobrepostos que apresentam duas aberturas. Sendo constante a rotação dos discos, em aproximadamente 260 rpm, a intensidade de precipitação da chuva simulada é definida a partir do grau de abertura que se encontram os discos sobrepostos. Uma grande dificuldade presente em trabalhos de campo com o *InfAsper* é a coleta e análise dos dados de enxurrada, que necessita a participação de uma equipe treinada e um bom planejamento logístico para armazenamento e transporte do material coletado até o laboratório.

Vislumbrando a possibilidade de aplicar chuvas com variação instantânea da intensidade de precipitação e avaliar as características da enxurrada em condições de campo formulou-se a hipótese de que a intensidade de precipitação do *InfAsper* pode ser controlada de forma eficaz pela rotação dos discos e que um coletor automático de enxurrada pode proporcionar uma melhoria na obtenção dos dados em campo. Para atender a essas demandas,

os objetivos do trabalho foram: a) desenvolver um novo painel controlador para o *InfiAsper* possibilitando a avaliação das perdas de solo e água sob diferentes padrões de chuva, e b) desenvolver um sistema automático de coleta de enxurrada que possibilite a quantificação do volume escoado e da perda de solo a partir de chuva simulada pelo *InfiAsper*.

Para elucidar as questões levantadas, a presente tese foi arquitetada em três Capítulos. O Capítulo I abordando o desenvolvimento do novo painel de controle para o simulador de chuvas. O Capítulo II referente ao uso do novo painel em teste de campo e avaliação dos resultados de perda de água e solo sob diferentes padrões de precipitação. E o Capítulo III referente ao desenvolvimento do protótipo do coletor automático de enxurrada para uso em conjunto com equipamentos simuladores de chuva.

2. CHAPTER I

A MODIFIED PORTABLE RAINFALL SIMULATOR FOR SOIL EROSION ASSESSMENT UNDER DIFFERENT RAINFALL PATTERNS

Capítulo publicado como artigo em: “Journal of Hydrology” 2021. (JCR 2020 = 5.722).
MACEDO, P. M. S.; PINTO, M. F.; ALVES SOBRINHO, T.; SCHULTZ, N.; COUTINHO, T. A. R.;
CARVALHO, D. F. A Modified portable rainfall simulator for soil erosion assessment under different rainfall
patterns. **Journal of Hydrology**, 596, 126052. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126052>. 2021.

2.1 RESUMO

Simuladores de chuva são dispositivos utilizados em estudos de erosão e infiltração da água no solo e possuem diferentes classificações e características operacionais. A maioria desses dispositivos simula chuvas com intensidade de precipitação (IP) constante, o que não representa as características das chuvas naturais e pode levar a diferenças significativas nos estudos de perdas de solo e água. No presente estudo foi desenvolvido um sistema de controle automático da IP automático para um simulador rotativo equipado com bicos, por meio da regulação da rotação do disco do obturador, visando simular diferentes padrões de precipitação. Foi montado um sistema de controle eletrônico que atua no inversor de frequência da potência do motor, permitindo ao usuário inserir o padrão de chuva desejado por meio de um arquivo texto, gravado em um cartão de memória micro SD. Para fins de avaliação, diferentes padrões de chuva foram programados para 40 min de duração, com picos de IP máximos de 110 mm h^{-1} e lâmina total de 30 mm. O novo painel do simulador foi construído com interface amigável, permite a seleção do padrão de chuva desejado e o modo de operação (manual ou automático). As chuvas foram simuladas adequadamente e mesmo com variação na IP, o simulador modificado apresentou uniformidade de aplicação acima de 75%.

Palavras-chave: Erosão hídrica. Chuva simulada. Intensidades de precipitação.

2.2 ABSTRACT

Rainfall simulators are devices used in studies on erosion and water infiltration in soil and have different classifications and operating characteristics. Most of these devices simulate rainfall with constant precipitation intensity (PI), which does not represent the characteristics of natural rainfalls and may lead to significant differences in studies on soil and water losses. In the present study we have developed an automatic PI control system for a rotating simulator equipped with nozzles, through the regulation of the shutter disc rotation, aiming simulate different hydrological patterns. We have set up an electronic control system that acts on the motor power frequency inverter, allowing the user to enter the desired rainfall pattern through a text file, recorded on a micro SD memory card. For evaluation purposes, different rainfall patterns were programmed for 40 min duration, with maximum PI peaks of 110 mm h^{-1} and total depth of 30 mm. The new panel of the simulator was built with user-friendly interface, enables the selection of the desired rainfall pattern and the operating mode (manual or automatic). The rainfalls were adequately simulated and, even with variation in PI, the modified simulator showed application uniformity above 75%.

Keywords: Water erosion. Simulated rainfall. Rainfall intensities.

2.3 INTRODUCTION

The search for sustainable use of soil resources is one of the main motivations for the study on erosion and the development of conservation practices that mitigate this natural process commonly accentuated by anthropic action. The world demand for food, fiber and fuel and the increase in areas with agricultural production and pastures have intensified erosion (MERTEN & MINELLA, 2013).

The erosive process is associated with large-scale factors, such as global warming (Lal et al., 2011), and with the characteristics of rainfall, climate, management, topography, as well as soil types and cover (Hamanaka et al., 2019), and is considered a global concern because it degrades the natural resources of soil and water, leading to major economic losses. In countries of tropical climate, water erosion is among the main causes of losses in the agricultural yield of food crops, resulting in increased production cost and environmental contamination (ANDRADE et al., 2011).

Soil losses can be generated with natural rainfall or through rainfall simulators, which are tools used in hydrogeomorphological or hydrological studies, in the field and in the laboratory (ASKOY et al., 2012), related to runoff, infiltration and sediment loss due to use, cover and management in different soil classes (SARASTY et al., 2017; BOULANGE et al., 2019). These devices make it possible to simulate rainfall with different characteristics (precipitation duration and intensity) and have been used to evaluate soil erodibility (MHASKE et al., 2019) and the impact of revegetation (ASKOY et al., 2012), besides generating information that validates conservation practices and models for estimating soil losses, provided that they have characteristics similar to those of natural rainfall, such as drop diameter and kinetic energy (MUNSTER et al., 2006). In addition to being simple, portable and economical (MHASKE et al., 2019), the simulators should have low water consumption (ISERLOH et al., 2012), precise control of precipitation intensity and provide a relationship between simulated/natural rainfall kinetic energy and uniformity above 75% (ALVES SOBRINHO et al., 2008).

According to the form of production of the drops (MORIN et al., 1967), rainfall simulators are classified into two categories, being equipped with drippers, composed of capillary tubes, or with nozzles, which operate with a wide range of precipitation intensity and drop diameter, enabling the formation of a more random drop falling pattern, similar to that of natural rain. The simulator developed by Alves Sobrinho et al. (2008), called *InfiAsper*, operates with two pressurized nozzles and is one of the most used devices in Brazil to simulate rainfall with constant precipitation pattern, according to previous calibration (CARVALHO et al., 2015; PANACHUKI et al., 2015; VALIM et al., 2016; ALMEIDA et al., 2018; MARQUES et al., 2019; MORAES et al., 2019). However, as natural rainfall events are variable in space and time (ASSOULINE, 2009), the natural process of soil loss is best reproduced when the simulators have mechanisms for varying the intensity during the occurrence of precipitation (NIELSEN et al., 2019). According to Alavinia et al. (2019), rainfalls simulated with constant intensity do not represent the characteristics of natural rainfalls, leading to significant differences in the results of soil losses.

The combination of different precipitation intensities during rainfall is called a rainfall pattern (LUO et al., 2020) and is considered one of the main factors that influence soil erosion (HUIHUI et al., 2016). Rainfall pattern classified as delayed, when the peak of precipitation intensity occurs on the final third of the rain (FLANAGAN et al., 1988), tends to generate higher rates of soil loss and runoff volume considering that the highest intensity occurs in water-saturated soil (WANG et al., 2016; SOFIA et al., 2019). Therefore, the possibility of adapting and updating the original control panel of *InfiAsper* with the application of a rotation

microcontroller device, to obtain different pre-set rainfall patterns, is a fundamental improvement in its operation and, consequently, in the quality of the obtained data.

The study was conceived based on the hypothesis that the variation in the shutter disc rotation in the rainfall simulator *InfiAsper* (ALVES SOBRINHO et al., 2008) makes it possible to change precipitation intensity and obtain different rainfall patterns with no simultaneous alteration in the shutter opening. Thus, the objective of this study was to evaluate whether the variation in the shutter disc rotation, associated with its opening, enables the obtaining of different rainfall patterns in the rainfall simulator *InfiAsper*.

2.4 MATERIAL AND METHODS

The rainfall simulator used in this study was the *InfiAsper*, developed by Alves Sobrinho et al. (2002, 2008), composed of five independent modules, which facilitate transport and operation in the field (Figure 1). It has two fixed spray nozzles (Veejet 80.150 model), which must be positioned at 2.30 m height from the ground during operation (Figure 2a). The nozzles are located above the shutter's overlapping discs (Figure 2b), whose rotation is defined by the input frequency of the shutter motor, using the frequency inverter installed on rainfall simulator panel (Figure 2c).

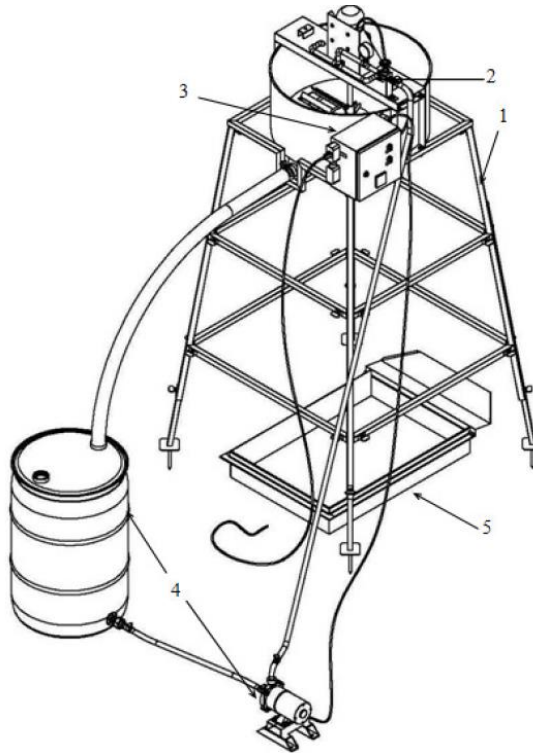
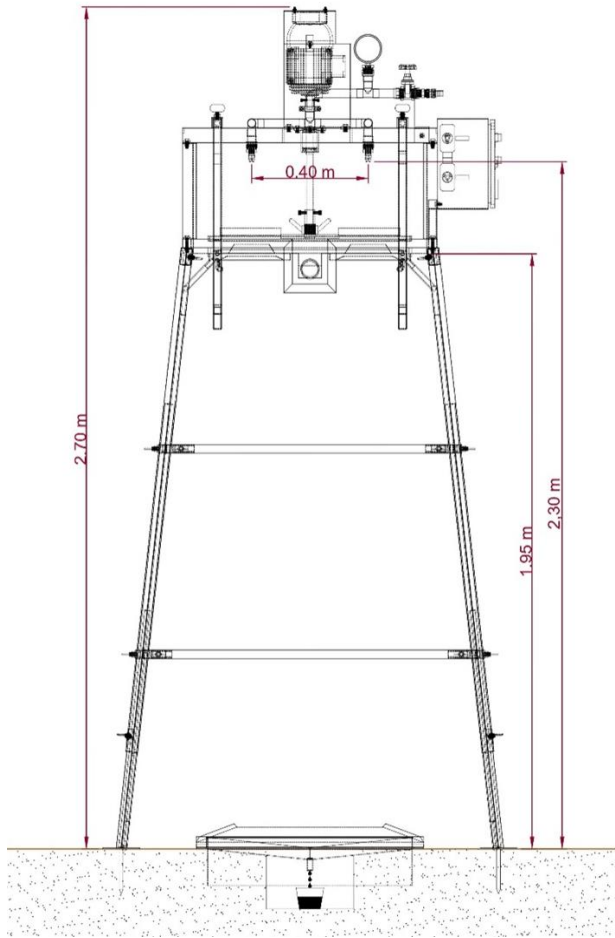


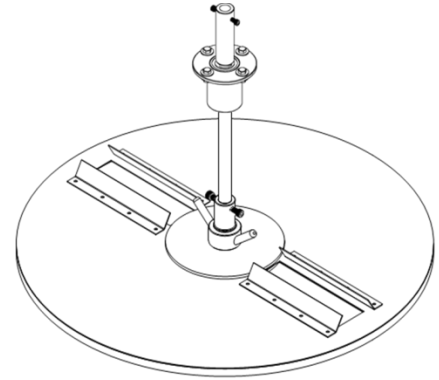
Figure 1. Scheme of the components of the *InfiAsper* rainfall simulator (Legend: metallic structure (1); water application unit (2); control panel (3); reservoir and water pump (4); and runoff collector (5)).

Traditionally, the device is used with constant rotation and the precipitation intensity (PI) is obtained by adjusting the opening of rotating shutter's discs. The water that does not pass through the disc opening is collected by blocking device for intercepting water, that redirects it to a deposit, reducing the demand for water. Thus, as the flow applied by the nozzles is constant, for a given water pressure, the larger the disc opening, the greater the amount of water that passes through them and, consequently, the greater the PI. However, we conducted tests in the laboratory to evaluate the possibility of varying PI in response to the variation in the rotation of the shutter's discs. Thus, for better adjustment in frequency variation, a 10 k Ω potentiometer was installed in the control port of the frequency inverter, which was previously set to remote mode.

(a)



(b)



(c)



Figure 2. *InfiAsper* rainfall simulator (a), shutter discs for regulating precipitation intensity (b) and control panel (c).

Figure 3 shows the electrical diagram of the motor pump drive circuits, consisting of a switch (S1), contactor switch (K1), thermal relay (TR1) and the shutter activation and rotation control circuit, composed of a switch (S2), frequency inverter (INV) and potentiometer (P1). For the rotations of 140, 200, 260, 400, 600 and 800 rpm and disc openings of 33, 44, 56 and 60 mm, the PI was evaluated in tests with duration of 10 min and pressure of 27.6 kPa in the nozzles. The consumption (C_w) and efficiency of water application (E_w) were also evaluated for the same rotations and openings, during 3-minute tests. The C_w represents the volume of water applied by simulator, collected manually at the exit of the nozzles, while the E_w is the ratio between the volume of water collected in simulator runoff collector (Figure 1) and C_w .

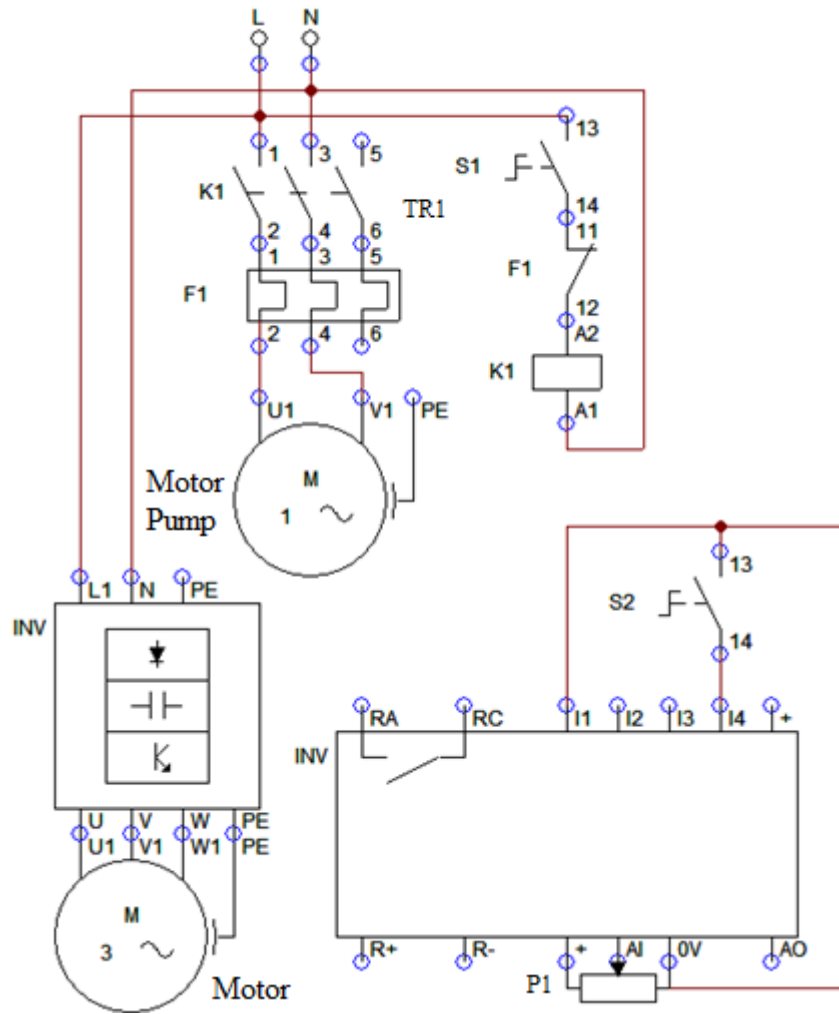


Figure 3. Electrical scheme of the original panel with the addition of the potentiometer for controlling the rotation.

Considering the structure of the device and the shutter openings, rotation values below 140 rpm favor the undesirable intermittency of rainfall directed to the flow collector. On the other hand, rotations above 800 rpm cause instability of the simulator structure and direct the water out of the simulator, significantly reducing its efficiency and precipitation uniformity. With the results obtained from this first evaluation, a multiple regression analysis was carried out in order to select the best model for the estimation of PI, from rotation and disc opening data. The regression models were analyzed using the minimal squares method and the significance of the estimated coefficients and the adequacy of the model were tested using the *t* test and analysis of variance, respectively, at 5% probability. All statistical analyzes were conducted using the R software package, version 3.6.0.

After identifying the disc opening that generated the best results and maintaining the previous rotations, we evaluated the water pressures in the nozzles of 20.7 and 34.6 kPa, for which we measured the PI and the coefficient of uniformity (CU) according to Christiansen (1942) (Eq. (1)).

$$CU = \frac{1 - \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{\bar{x} * n} \quad (1)$$

Where x_i is individual water amount per rain collector [mL], \bar{x} the arithmetic mean of applied water amount per rain collector [mL] and n is the total number of rain collectors. In the calibration tray (0.7 m²), corresponding to the simulator runoff collector, we used a grid of 25 collectors, with area of 50 cm² per collector.

With the most adequate disc opening and water pressure, we conducted tests to determine the average volumetric diameter of the drops, using the flour method (Kathiravelu et al., 2016). In these tests, the drops are collected on a tray containing sifted wheat flour and positioned at 30 cm height from the ground, to avoid the splash effect. After 5 s under rainfall, the collected material is covered with a thin layer of flour and remains at rest, drying in the air for 24 h. After this time, the material is placed in a microwave oven for 3 min (Garcia et al., 2014) for complete drying. Dry granules are then separated by sieving through 4.0, 2.0, 1.0, 0.5 and 0.25 mm meshes and weighed on an electronic scale to obtain the average mass of the granules. Considering that the drops have a spherical shape, their diameter and volume were determined using the equations presented by Iserloh et al. (2013). The accumulated volume and the average diameter of drops retained on each sieve were used to determine the average diameter shown by 50% of the drops (D50). The data of PI, D50, water pressure, fall height and applied water depth were used to calculate the fall time, the initial and final velocities of the drop, the kinetic energy of simulated rainfall (KeS) and its relationship with the kinetic energy of natural rainfall with equivalent intensity (KeN). The calculations were performed using a computational routine developed according to the methodology described by Alves Sobrinho et al. (2008).

After evaluating the device under different shutter rotations, a new control panel was built for the *InfiAsper*, which enabled the simulation of rainfall with variable intensity in time. For this, we set up an electronic control system that enables the user to enter rainfall patterns using an SD memory card, which is read by a microcontroller, and sends analog signal to the frequency inverter, acting on the shutter rotation. The control system has a user interface equipped with buttons, which enable the selection of the desired rainfall pattern and the mode of operation: manual (precipitation intensity controlled by potentiometer) or automatic (precipitation intensity controlled by data on the memory card). These features provide flexibility for the user in rainfall simulation tests, meeting the most diverse demands in research.

The new control panel is composed of frequency inverter, thermal relay, contactor switch, Arduino Mega® 2560 microcontroller, relay module, 10 k Ω potentiometer, micro SD card module and electronic circuit for user interface, composed of buttons and other basic components. The relay module is responsible for changing the simulation function, from manual to automatic, besides enabling the activation of the thermal relay/contactor switch set that controls the motor pump activation. After receiving the information through the Arduino's PWM (Pulse Width Modulation) analog port or through the potentiometer (manual mode), the frequency inverter is able to control the level of rotation of the device's shutter. The microcontroller is responsible for controlling the relay module and frequency inverter, according to the embedded program in C++ language, whose algorithm is presented in Figure 4. Data of rainfall patterns are obtained by reading the micro SD card, on which the corresponding files are recorded with text file extension (txt). Therefore, in each reading of the selected file, the microcontroller sends the analog signal to the frequency inverter, corresponding to the previously calibrated rotation values.

In the flowchart, the routines associated with the variables i give access to the rainfall patterns recorded on the micro SD card, in which the indices 1, 2, 3 and 4 correspond, respectively, to the Advanced, Intermediate, Delayed and Custom patterns. As indicated, the Custom pattern is defined by the user and, for testing purposes, the inverted Intermediate was used. Delays of 0.1 s correspond to the delays employed in the programming. After choosing

the routine, the confirmation button is activated and, after 1 min, the *Arduino* begins transmitting the information to the frequency inverter and starting the rainfall simulation, which can have a maximum duration of 60 min ($t \leq 60$).

The equation presented in Figure 5 made it possible to calculate the rotation as a function of the desired PI, enabling the construction of the rainfall patterns evaluated and the programming of the microcontroller of the new *InfAsper* panel.

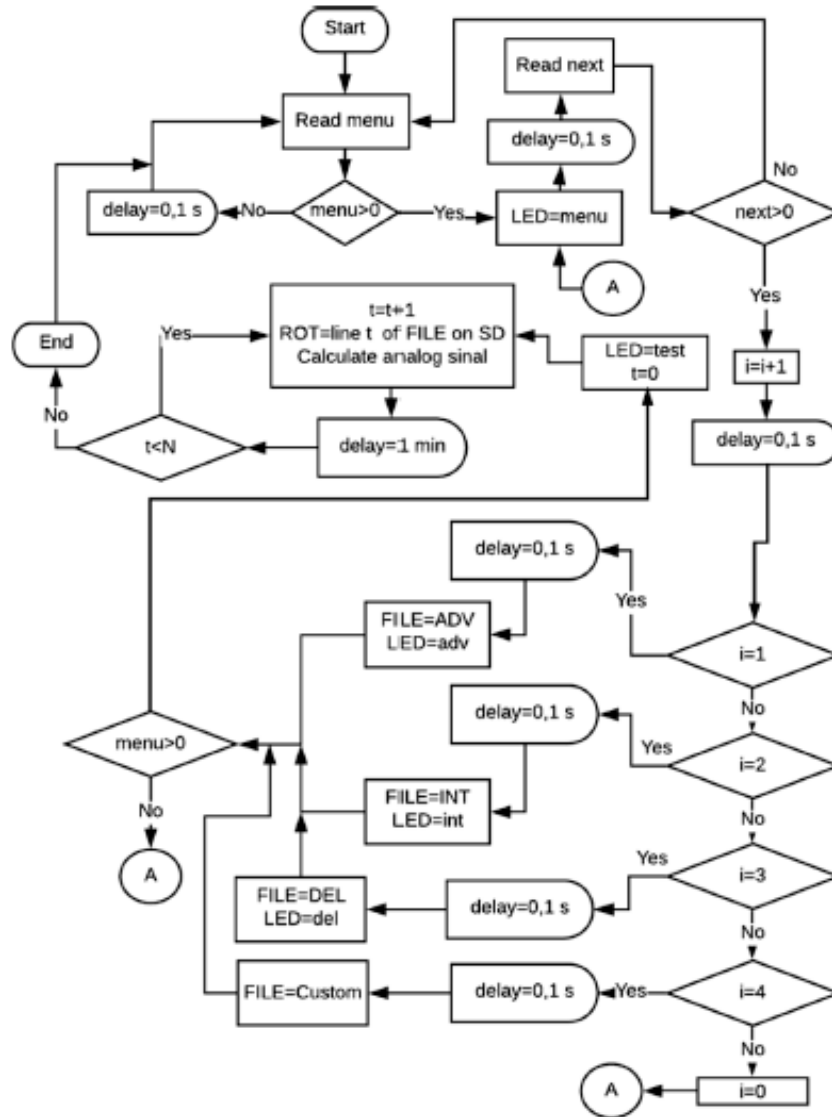


Figure 4. Flowchart illustrating the logic used in the programming of the microcontroller which controls the reading of the hydrological patterns. i : index of hydrological patterns; t : test time (min) and line number in the txt file; N : total duration of the test, min; FILE: File to be read on SD card; ADV: advanced; INT: intermediate; DEL: delayed.

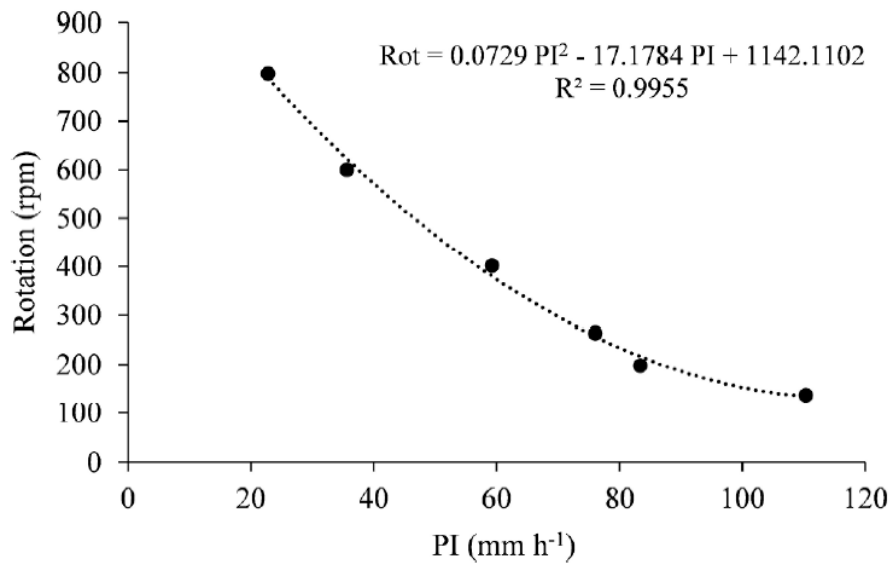


Figure 5. Calibration curve of the device’s rotation according to the precipitation intensity used for constructing hydrological patterns that can be programmed on the panel.

For evaluation of the device, rainfalls of 40 min-duration were simulated, with maximum PI of 110 mm h⁻¹ and total depth of 30 mm (Figure 6). These values represent the IP and the average depth of intense rainfall in the region of Seropédica, State of Rio de Janeiro, Brazil (CARVALHO et al., 2005), where the study was developed.

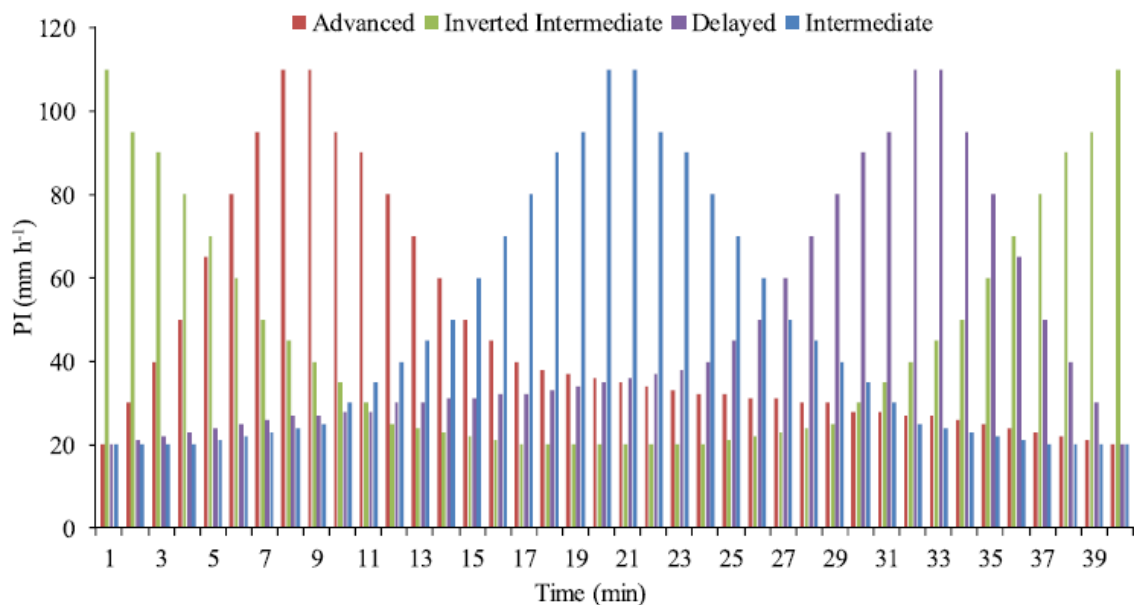


Figure 6. Rainfall patterns generated with the calibration of the device programmed for tests with duration of 40 min, maximum PI peaks of 110 mm h⁻¹ and total depth applied of 30 mm.

The minimum PI adopted is 20.0 mm h⁻¹ and every minute it varies according to the rainfall pattern. Other PI and depths can be programmed and applied by the simulator, by

changing the application time and/or the device's settings, such as opening of the discs and water pressure in the nozzles.

According to Mohamadi and Kavian (2015), rainfall patterns of the types Advanced, Intermediate, Inverted Intermediate and Delayed were programmed and new tests were conducted with the new panel, with three repetitions for each of the aforementioned rainfall patterns, in addition to the constant PI pattern. In each test, rainfall uniformity (CU) and water consumption (Cw) were evaluated, in addition to PI variability in the collection channel, presented in the following classes: $PI < 20$; $20 \leq PI < 25$; $25 \leq PI < 30$; $30 \leq PI < 35$; $35 \leq PI < 40$; $40 \leq PI < 45$; $45 \leq PI < 50$ and PI greater than 50 mm h^{-1} . To evaluate the manual function of the system and as a control in comparative tests, the constant pattern was simulated with an average blade of 30 mm.

In other words, PI variability is presented in classes from 5 to 5 mm h^{-1} . In order to check the operation of *InfiAsper* with the new panel in field conditions, some tests were carried out in an area with soil classified as Ultisol, of medium texture, with 540, 150 and 310 g kg^{-1} of sand, silt and clay, respectively, in the 0–27 cm layer (ALMEIDA et al., 2019). The soil layer from 0 to 20 cm was tilled with two operations with a disc harrow and one with a leveling harrow. With the same programming used in laboratory, the data were collected and compared with the results obtained in the same experimental area by Almeida et al. (2019), using the traditional *InfiAsper*, and Oliveira et al. (2010), using an intermittent rainfall simulator, according to Meyer and Harmon (1979).

2.5 RESULT AND DISCUSSION

2.5.1 Precipitation intensity, water consumption and efficiency

With the tested rotations (140, 200, 260, 400, 600 and 800 rpm) and disc openings (33, 44, 56 and 60 mm), the device showed PI ranging from 0.7 to 123.4 mm h⁻¹, Cw from 0.02 to 2.53 L min⁻¹ and Ew from 41.2 to 56.8% (Table 1). These results indicate the ability of the equipment to apply rains with different PI values, which resembles natural events that normally do not present constant intensity.

Table 1. Precipitation intensity (PI), water consumption (Cw) and water use efficiency (Ew) for the different openings and rotations of the device.

Rotation (rpm)	Openings (mm)											
	33			44			56			60		
	PI (mm h ⁻¹)	CW (L min ⁻¹)	EW (%)	PI (mm h ⁻¹)	CW (L min ⁻¹)	EW (%)	PI (mm h ⁻¹)	CW (L min ⁻¹)	EW (%)	PI (mm h ⁻¹)	CW (L min ⁻¹)	EW (%)
140	58.4	1.18	57.7	80.0	1.66	56.2	110.3	2.22	57.0	123.4	2.53	56.8
200	44.0	1.02	50.3	62.1	1.34	53.9	83.4	1.78	57.1	98.2	2.15	53.3
260	36.0	0.74	56.7	54.1	1.15	55.0	76.1	1.60	56.4	89.2	1.88	55.3
400	21.0	0.43	57.2	37.0	0.79	54.9	59.3	1.27	53.7	71.0	1.56	53.3
600	6.9	0.15	54.5	18.4	0.39	54.5	35.7	0.86	51.9	48.2	1.12	50.1
800	0.7	0.02	41.2	6.1	0.15	48.5	22.8	0.52	47.0	30.5	0.73	48.6
Average		0.59	52.93		0.91	53.82		1.37	53.87		1.66	52.91

These values indicate that *InfiAsper* is more efficient and requires lower water volume than the 13 simulators evaluated by Irseloh et al. (2013), which had Ew ranging from 4.2 to 49.3% and Cw from 0.48 to 3.24 L min⁻¹, for fixed PI from 37 to 75 mm h⁻¹.

Precipitation intensity increases with the reduction in shutter rotation and increase in disc opening. According to equation 2, there is a polynomial relationship of two factors (rotation and opening), which had adjusted R² of 0.985, with significance of the parameters (**p < 0.01). The equation enables the estimation of PI for other values of opening (Opn) and rotation (Rot), within the range of evaluated values, giving versatility to the simulator and facilitating the planning of new studies.

$$PI = 63,38 - 0,38 \text{ Opn} - 0,1579 \text{ Rot} + 0,03019 \text{ Opn}^2 + 0,0001361 \text{ Rot}^2 - 0,00169366 \text{ Opn Rot} \quad (2)$$

According to the preliminary results, the 56 mm opening was adopted for the continuity of the tests, since it provided, on average, higher values of Ew and the desired range of PI.

2.5.2 Coefficient of uniformity and operating pressure

For the different pressures evaluated, the CU ranged from 54.2 to 81.4%, with the highest values associated with the lowest rotations and, consequently, the highest intensities (Table 2). The decrease in uniformity with increasing rotation, for a given opening of the discs, is a consequence of the greater dispersion of water out of the runoff collector.

Table 2. CU values and precipitation intensity (PI) for different shutter rotations and operating pressures, for a disc opening of 56 mm.

Rotation (rpm)	Frequency (Hz)	Water Pressure (kPa)					
		20,7		27,6		34,5	
		CU (%)	PI (mm.h ⁻¹)	CU (%)	PI (mm.h ⁻¹)	CU (%)	PI (mm.h ⁻¹)
140	2.35	80.5	95.7	81.4	110.3	81.4	107.1
200	3.36	79.2	79.7	81.2	83.4	83.2	86.7
260	4.35	78.5	76.0	78.6	76.1	78.9	73.2
400	6.65	71.1	60.3	72.7	59.3	72.5	65.1
600	10.00	54.9	25.5	61.8	35.7	66.3	51.6
800	13.35	60.4	38.9	54.2	22.8	55.5	40.8
Average		72.6	66.4	73.4	67.8	74.8	74.3

Frequency (Hz) values presented were used as a basis for calculating the rotation (rpm) in the frequency inverter programming. For rotations greater than 260 rpm, CU is lower than 75%, hence considered not suitable for rainfall simulators (Alves Sobrinho et al., 2002). However, this fact does not indicate limitation of the device because in rainfalls simulated with variable intensity CU should be evaluated along the entire event and not at specific intensities. Among the simulators evaluated by Iserloh et al. (2013), CU values ranged from 60.6 to 97.8%, operating with PI of 51 and 48 mm h⁻¹, respectively. These devices belong to the same category as *InfiAsper* but have a circular collector channel. As the mean CU values were above 70%, we chose to maintain the water pressure in the nozzles of 27.6 kPa in the sequence of the proposed evaluation tests, given the wider range of PI values.

2.5.3 Kinetic energy and drop diameter

For the different rotations of the discs, D50 values ranged from 1.45 to 2.20 mm (Figure 7) and are consistent with those found by Kavian et al. (2019) and Naves et al. (2020). The simulators evaluated by Iserloh et al. (2013) showed D50 ranging from 0.5 to 5.0 mm. It is worth mentioning that drop diameter is a function of several factors such as water pressure, type of nozzle and fall height.

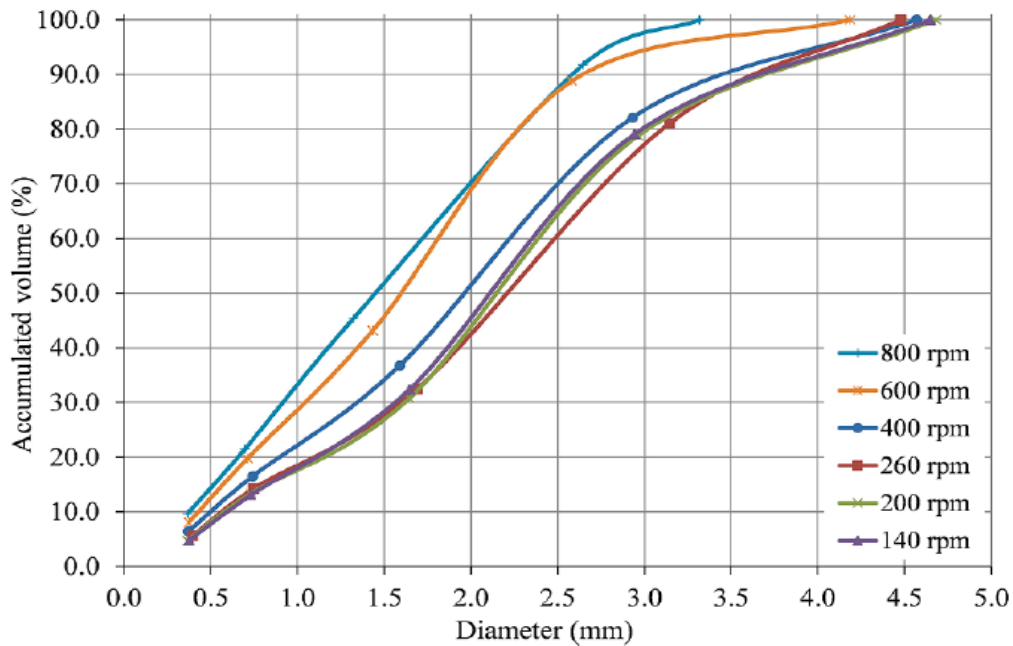


Figure 7. Accumulated volume versus drop diameter for obtaining D50.

Besides this, the reduction in the average diameter of drops for rotation above 260 rpm occurs due to the impact between them caused by the drag in response to the increased turbulence in the water jet. Regardless of its value, the most important point is that the device must be able to simulate rainfall with kinetic energy similar to that of natural rainfall. For the rotations and other characteristics adopted, the kinetic energy of the rainfall ranged from 17.82 to 23.73 J m⁻² mm⁻¹, simulating the natural rainfall from 73.82 to 88.03% (Table 3).

2.5.4 Development of control panel and evaluation of precipitation patterns

From the proposed flowchart (Figure 4), a new electrical scheme was developed (Figure 8), enabling the construction of the new *InfiAsper* control panel (Figure 9). The activation buttons present in the original panel (Figure 3) were replaced by relays (RL1; RL2; RL3 and RL4), which make it possible to choose the simulator's operation mode (manual or automatic), the activation of the motor pump and the activation and control of the shutter rotation from the electronic system (controller), composed of the microcontroller, micro SD card and interface (buttons: MENU and NEXT; LEDs: test, adv, int, del, menu, ok). Additionally, an emergency button has been inserted for full interruption of inverter operation (B0).

Table 3. Values of rotation, drop diameter (D50), simulated rainfall kinetic energy (KeS) and relationship between simulated/natural kinetic energy (KeS/KeN) for tests with pressure of 27.56 kPa.

Rotation (rpm)	D ₅₀ (mm)	KeS (J m ⁻² mm ⁻¹)	KeS/KeN (%)
140	2.10	23.09	83.06
200	2.15	23.41	86.21
260	2.20	23.73	88.03
400	1.95	22.05	83.58
600	1.60	19.23	76.32
800	1.45	17.82	73.82

During the tests, no failures were identified in the configuration of the controller through the interface developed, demonstrating its robustness and simplicity, which is important for a rainfall simulator, especially for operation under field conditions. In addition, there was adequate communication between the components, and no failures were identified during the tests. After conducting new tests, we found that the spatial distribution of PI is similar between the rainfall patterns tested (Figure 10) and similar to that obtained for the device called Tübingen, evaluated by Iserloh et al. (2013). Despite the variation of PI during the rainfall application, CU values higher than 75% indicate adequacy of the device in the simulation of different rainfall patterns and are higher than those presented in Table 2, for constant PI.

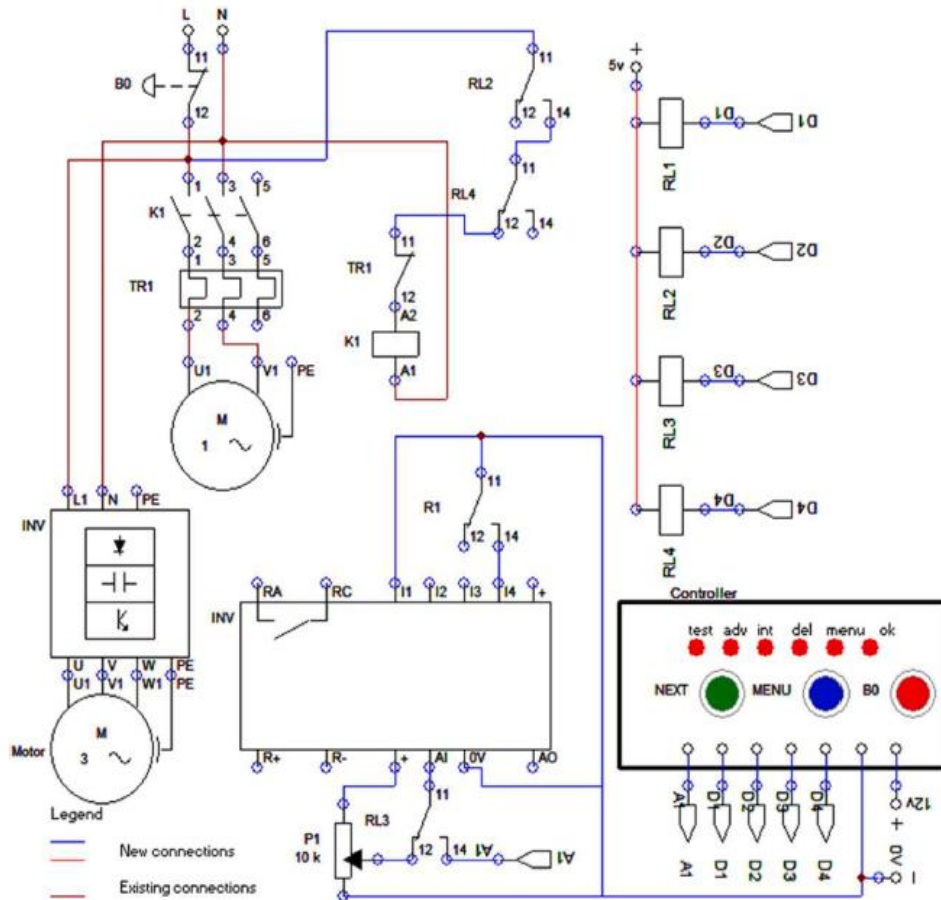


Figure 8. Electronic diagram of the new *InfiAsper* panel.

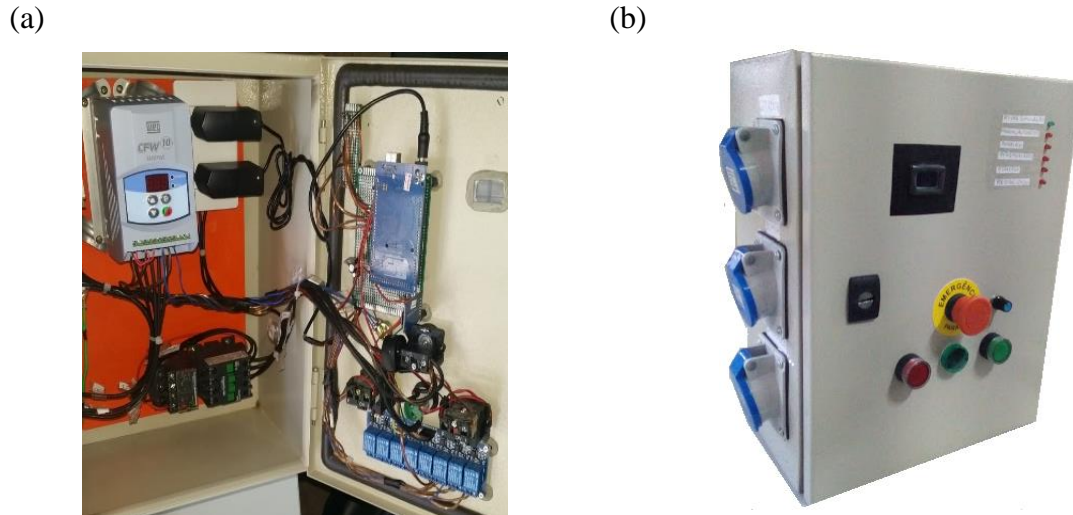


Figure 9. New control panel of the rainfall simulator *InfiAsper*: (a) internal components and (b) external interface.

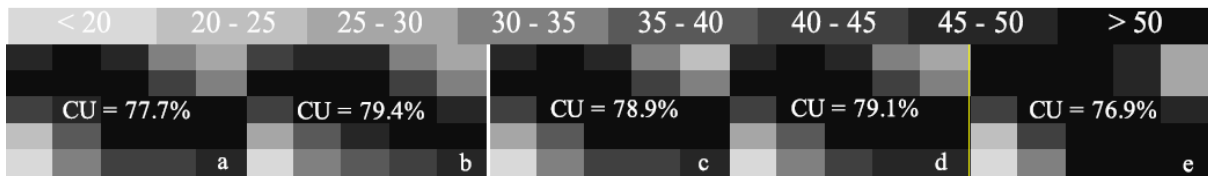


Figure 10. Spatial distribution of PI of the rainfalls applied by *InfiAsper* ranging from <20 to >50 mm for Advanced (a), Intermediate (b), Delayed (c), Inverted Intermediate (d) and Constant (e) patterns (mm h^{-1}).

As the mean C_w of all patterns was 1.0 L min^{-1} and the E_w was 51.4%, we found that *InfiAsper*, with the proposed modifications, is more efficient in water application than the models evaluated by Iserloh et al. (2013), which had efficiencies ranging from 4.2 to 49.3%. From the characterization and evaluations carried out, we can confirm the viability of the device in obtaining rainfall with regional hydrological characteristics, according to Carvalho et al. (2005).

2.5.5 Field testing

The simulator was evaluated under field conditions following the patterns of the Figure 6 and the results are presented in the form of surface runoff and soil loss rate (Figure 11). Runoff was monitored up to 50 min, as it continues even after the end of the simulated rains. The simulated rainfalls with constant and inverted intermediate patterns did not provide runoff and, consequently, soil losses. In the intermediate and delayed patterns, the PI peak occurs when the superficial layers of the soil are already wet, which potentializes the runoff and erosion process, mainly in the absence of land cover (CARVALHO et al., 2012).

The soil losses obtained are different than those found in other studies carried out in the same experimental area, but with simulated rainfall of different characteristics. Using the traditional *InfiAsper*, Almeida et al. (2019) obtained a maximum soil loss rate of $9.5 \text{ g m}^{-2}\text{h}^{-1}$, after 25 min of rain with PI constant of 76.5 mm h^{-1} . With an intermittent rainfall simulator, Oliveira et al. (2010) found 36.2, 66.3 and $86.2 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ of soil loss, respectively, for advanced, intermediate and delayed patterns, when simulated rains with the same

characteristics were applied. However, the tests were carried out after preparing of soil towards the slope, simulating critical runoff conditions, which is why higher soil loss values were obtained.

The results presented in these articles are also associated with the form of rain application and the type of equipment used, either by constant PI or by intermittent application, situations that do not fully represent the natural rainfall conditions. Therefore, it is possible to verify that the erosive process is consistent with the applied rain, depending also on the land cover and soil properties and preparation. Even with the promising results using the new panel of *InfiAsper*, measurements of soil and water losses from rainfall simulators should be carried out with caution and whenever possible compared to natural rain events.

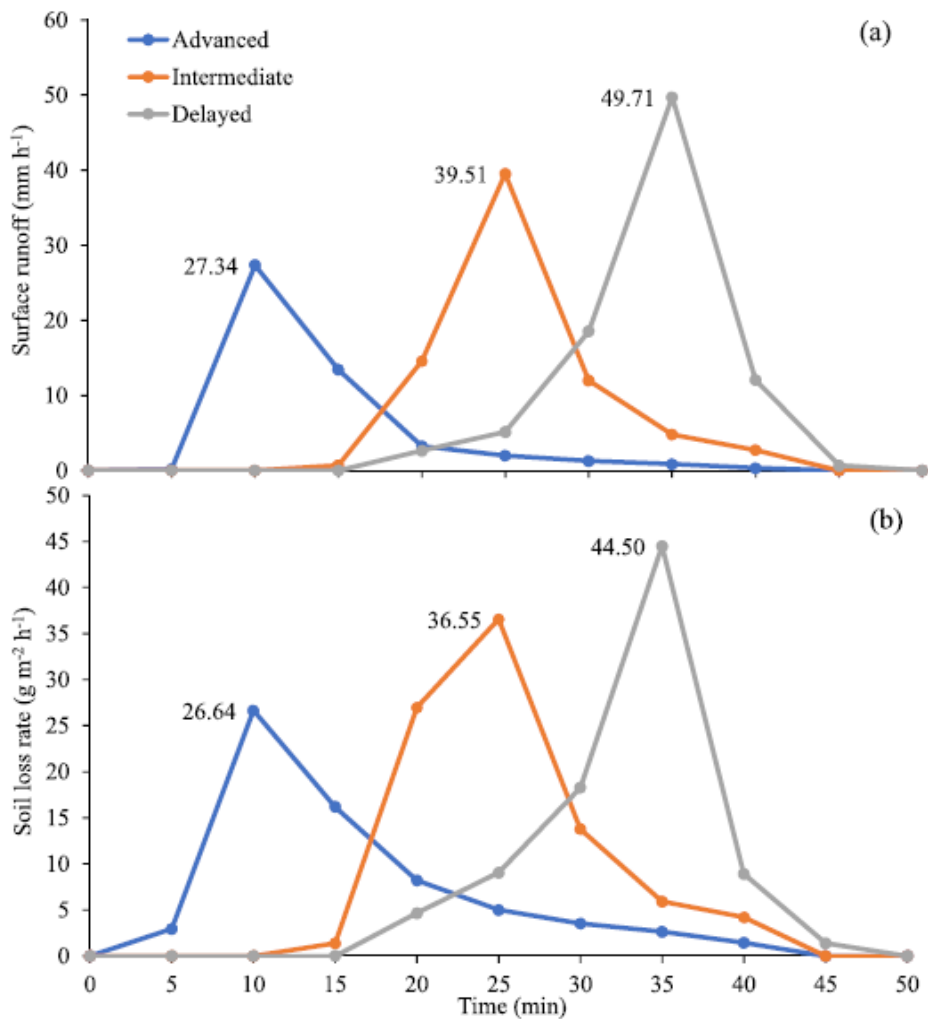


Figure 11. Surface runoff (a) and soil loss rates (b) for different simulated rainfalls patterns obtained by new *InfiAsper*.

2.6 CONCLUSIONS

The installation of electronic components in the *InfiAsper* control panel makes it possible to vary shutter rotation during its operation according to previous programming, enabling the simulation of rainfalls with different rainfall patterns. Rainfalls with PI peaks of 110 mm h^{-1} and duration of 40 min were adequately simulated by the device, with uniformity of application above 75%. It is possible to simulate other rainfall patterns, with different PI and duration, by changing the settings on the device's panel.

2.7 REFERENCES

- ASKOY, H.; UNAL, E.; COKGOR, S.; GEDIKLI, A.; YOON, J.; KOCA, K.; INCI, S. B., ERIS, E. A. Rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. **Catena**, v.98, p.63-72, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.06.009>.
- ALAVINIA, M.; SALEH, F. N.; ASADI, H. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion. **International Journal of Sediment Research**, v.34, p.270-278, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.11.001>.
- ALMEIDA, W. S.; PANACHUKI, E.; OLIVEIRA, P. T. S.; MENEZES, R. S.; ALVES SOBRINHO, T., CARVALHO, D. F. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil & Tillage Research**, v.175, p.130-138, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>.
- 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, p.337-344, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662002000200025>.
- ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; GÓMEZ, J. A. A portable integrated rainfall and overland flow Simulator. **Soil Use and Management**, v.24, p.163-170, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00150.x>.
- ANDRADE, N. S. F.; MARTINS FILHO, M. V.; TORRES, J. L. R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J. Impacto técnico e econômico das perdas de solo e nutrientes por erosão no cultivo da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v.31, p.539-550, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162011000300014>.
- ASSOULINE, S. Drop size distributions and kinetic energy rates in variable intensity rainfall. **Water Resources Research**, v.45, p.1-7, 2009. <https://doi.org/10.1029/2009WR007927>.
- BOULANGE, J.; MALHAT, F.; JAIKAEW, P.; NANKO, K.; WATANABE, H. Portable rainfall simulator for plot-scale investigation of rainfall-runoff, and transport of sediment and pollutants. **International Journal of Sediment Research**, v.34, p.38-47, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.08.003>.
- CARVALHO, D. F.; EDUARDO, E. N.; ALMEIDA, W. S.; SANTOS, L. A. F.; ALVES SOBRINHO, T. Hydric erosion and water infiltration in different soil management system and corn development stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.1076-1082, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1072-1078>.
- CARVALHO, D. F.; MONTEBELLER, C. A.; FRANCO, E. M.; VALCARCEL, R., BERTOL, I. Padrões de precipitação e índices de erosividade para as chuvas de Seropédica e Nova Friburgo, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.7-14, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000100002>.
- CARVALHO, D. F.; SOUZA, W. J.; PINTO, M. F.; OLIVEIRA, J. R.; GUERRA, J. G. M.; Perdas de água e solo sob diferentes padrões de chuva simulada e condições de cobertura do

solo. **Engenharia Agrícola**, v.32, p.708-717, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000400010>.

FLANAGAN, D. C.; FOSTER, G. R.; MOLDENHAUER, W. C. Storm patterns effect on infiltration, runoff, and erosion. **Trans. ASAE**, v.31, n.2, p.414-420, 1988. <https://doi.org/10.13031/2013.30724>.

HAMANAKA, A., SASAOKA, T., SHIMADA, H., MATSUMOTO, S. Experimental study on soil erosion under different soil composition using rainfall simulator. **Plant, Soil and Environment**, v.65, p.181-188, 2019. <https://doi.org/10.17221/68/2019-PSE>.

HUIHUI, Z., NA, T., QINGFENG, Z. Spatial heterogeneity of loess contour tilled microtopographic slope in rainfall erosion. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.62, p.409-415, 2016. <https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1218742>.

ISERLOH, T.; FISTER, W.; SEEGER, M.; WILLGER, H.; RIES, J. B. A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion. **Soil & Tillage Research**, v.124, p.131-137, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.05.016>.

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. J.; 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, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013>.

KATHIRAVELU, G.; LUCKE, T.; NICHOLS, P. Rain Drop Measurement Techniques: A Review. **Water**, v.29, p.1-20, 2016. <https://doi.org/10.3390/w8010029>.

KAVIAN, A.; MOHAMMADI, M.; CERDÀ, A.; FALLAH, M.; GHOLAMI, L. Design, manufacture and calibration of the SARI portable rainfall simulator for field and laboratory experiments. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, p. 2150-2435, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1581364>.

LAL, R.; DELGADO, J. A.; GROFFMAN, P. M.; MILLAR, N.; DELL, C., ROTZ, A. Management to mitigate and adapt to climate change. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 66, p. 276-285, 2011. <https://doi.org/10.2489/jswc.66.4.276>.

LUO, J.; ZHENG, Z.; LI, T., HE, S. Temporal variations in runoff and sediment yield associated with soil surface roughness under different rainfall patterns. **Geomorphology**, V.349, p.106-915, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106915>.

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.1, p.2-17, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11071840>.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of Brazilian agriculture: soil erosion scenarios. **International Soil and Water Conservation Research**, v.1, p.37-48, 2013, <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0813-0>.

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

MHASKE, S. N., PATHAK, K., BASAK, A. A comprehensive design of rainfall simulator for the assessment of soil erosion in the laboratory. **Catena**, v.172, p.408-420, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.039>.

MOHAMADI, M. A.; KAVIAN, A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. **International Soil and Water Conservation Research**, v.3, p.273-281, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.10.001>.

MORAES, A. G. L.; CARVALHO, D. F.; ANTUNES, M. A. H.; CEDDIA, M. B.; FLANAGAN, D. F. Steady infiltration rate spatial modeling from remote sensing data and terrain attributes in Southeast Brazil. **Geoderma Regional**, v.20, e00242, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00242>.

MORIN, J., GOLDBERG, D., SEGNER, I. A rainfall simulator with rotating disk. **Trans. ASAE**, v.10, n.1, p.74–77, 1967. <https://doi.org/10.13031/2013.39599>.

MUNSTER, C. L.; TAUCER, P. I.; WILCOX, B. P.; PORTER, S. C.; RICHARDS, C. E. An approach for simulating rainfall above the tree canopy at the hillslope scale. **Transactions of the ASABE**, v.49, p.915-924, 2006. <https://doi.org/10.13031/2013.21737>.

NAVES, J.; ANTA, J.; SUÁREZ, J.; PUERTAS, J. Development and Calibration of a New Dripper-Based Rainfall Simulator for Large-Scale Sediment Wash-Off Studies. **Water**, v.12, p.1-15, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12010152>.

NIELSEN, K. T.; MOLDRUP, P.; THORND AHL, S.; NIELSEN, J. E.; DUUS, L. B.; RASMUSSEN, S. H.; UGGERBY, M.; RASMUSSEN, M. R. Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. **Hydrological Processes**, v.33, p.1-14, 2019. <https://doi.org/10.1002/hyp.13563>.

OLIVEIRA, J. R.; PINTO, M. F.; SOUZA W. J.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D. F. Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.140-147, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000200004>.

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

SARASTY, J.; ORTEGA, J. A.; CASTILLO, J. A.; CHAVES, G. Diagnóstico de problemas de manejo del suelo con abonos orgánicos utilizando un minisimulador de lluvia. **Revista Ciências Agrícolas**, v.34, p.46-61, 2017. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.173402.71>.

SOFIA, G.; RAGAZZI, F.; GIANDON, P.; FONTANA, G. D.; TAROLLI, P. On the linkage between runoff generation, land drainage, soil properties, and temporal patterns of

precipitation in agricultural floodplains. **Advances in Water Resources**, v. 124, p. 120-138, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.12.003>.

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

WANG, W.; YIN, S.; XIE, Y.; LIU, B.; LIU, Y. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall. **Catena**, v.141, p.56-65, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.019>.

3. CHAPTER II

SOIL LOSS AND RUNOFF OBTAINED WITH CUSTOMIZED PRECIPITATION PATTERNS SIMULATED BY INFIASPER

Capítulo publicado como artigo em: “International Soil and Water Conservation Research” (JCR 2020 = 6.027). Disponível online a partir de 11/02/2022.

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**, Manuscript Number: ISWCR-D-21-00415. 2022.

3.1 RESUMO

A aplicação da intensidade de precipitação constante, o que normalmente não ocorre em eventos naturais, é uma das principais limitações dos simuladores de chuva em estudos de erosão do solo. Assim, a aplicação de inovações tecnológicas que permitam obter acurácia nos resultados com baixo custo é relevante econômica e ambientalmente. O presente trabalho avaliou o simulador de chuvas *InfiAsper* operando com um novo painel de controle para programar chuvas com diferentes intensidades de precipitação (IP). As taxas de infiltração e as perdas de solo e água foram avaliadas em um Argissolo Distrófico de textura franco-argilosa com chuvas simuladas de 30 mm e duração de 40 min, considerando os padrões avançado (AV), intermediário (IN), atrasado (AT) e intermediário invertido (II), todos com picos de PI de 110 mm h⁻¹ e um padrão constante (CT). O delineamento experimental foi em blocos casualizados com cinco tratamentos (padrões pluviométricos) e unidades experimentais medindo 2,5 x 2,5 m com espaçamento de 1,0 m. O simulador funcionou satisfatoriamente, aplicando as chuvas de acordo com os programas pré-configurados. As chuvas simuladas com os padrões CT e II não promoveram escoamento superficial nem perda de solo. As taxas de infiltração e escoamento variaram de acordo com o padrão de chuva aplicado, atingindo picos de 97,8 e 27,3 mm h⁻¹ (AV), 82,1 e 39,5 mm h⁻¹ (IN) e 76,2 e 49,7 mm h⁻¹ (AT), respectivamente. A perda de solo e o escoamento superficial totalizaram cada 4,77 g m⁻² e 3,9 mm (AV), 6,70 g m⁻² e 6,8 mm (IN), e 6,03 g m⁻² e 7,0 mm (AT). O simulador *InfiAsper* modificado para aplicar padrões de chuva personalizados permite variar a intensidade de precipitação, além de obter resultados satisfatórios em campo e informações condizentes com as características esperadas dos padrões naturais de chuva. Nos padrões de chuvas intermediário e atrasado, as perdas de solo e água foram maiores do que no avançado.

Palavras-chave: Erosão hídrica. Simulador de chuvas. Intensidade de precipitação.

3.2 ABSTRACT

Applying constant precipitation intensity, which normally does not occur in natural events, is one of the main limitations concerning rainfall simulators in soil erosion studies. Thus, the application of technological innovations that allow obtaining accurate results at a low cost is economically and environmentally relevant. The present work evaluated the *InfiAsper* rainfall simulator operating with a new control panel to program rainfalls with different precipitation intensities (PI). Infiltration rates and soil and water losses were evaluated in a Distrophic Acrisol with a clay loam texture with simulated rainfalls of 30 mm and duration of 40 min, considering advanced (AD), intermediate (IN), delayed (DE), and inverted intermediate (II) patterns, all with PI peaks of 110 mm h⁻¹, and a constant (CT) pattern. The experimental design was in randomized blocks with five treatments (rainfall patterns) and experimental units measuring 2.5 x 2.5 m with 1.0 m spacing. The simulator worked satisfactorily, applying the rainfall according to the preconfigured programs. The simulated rainfall with the CT and II patterns did not promote runoff nor soil loss. Infiltration and runoff rates varied according to the applied rainfall pattern, reaching peaks of 97.8 and 27.3 mm h⁻¹ (AD), 82.1 and 39.5 mm h⁻¹ (IN), and 76.2 and 49.7 mm h⁻¹ (DE), respectively. Soil loss and surface runoff totaled each 4.77 g m⁻² and 3.9 mm (AD), 6.70 g m⁻² and 6.8 mm (IN), and 6.03 g m⁻² and 7.0 mm (DE). The *InfiAsper* simulator modified to apply customized rainfall patterns enables varying precipitation intensity besides obtaining satisfactory results in the field and information consistent with the expected characteristics of natural rainfall patterns. In the intermediate and delayed rainfall patterns, soil and water losses were higher than in the advanced.

Key words: Water erosion. Rainfall simulator. Precipitation intensity.

3.3 INTRODUCTION

Research involving the use of rainfall simulators dates to 1930. Since then, the evolution of this equipment has made it increasingly accessible, practical, and accurate (ALVES SOBRINHO et al., 2008). Its applications include evaluating the impacts of water erosion on soil degradation as a function of land use and occupation (WANG et al., 2016; BORRELLI et al., 2018; ALMEIDA et al., 2019) and soil water infiltration rate (ALMEIDA et al., 2018; MORAES et al., 2019), besides promoting the calibration of hydrological and erosion prediction models (CONNOLLY et al., 1991; ALAVINIA et al., 2019).

Studies with rainfall simulators have advantages compared to natural rainfall, such as reducing the time and costs necessary for research conduction. Experiments based on natural rainfall require lengthy monitoring periods and repetitions over time (ALVES SOBRINHO et al., 2008). In addition, either in the field or in the laboratory, the use of simulators eliminates the erratic and unpredictable variability of natural rainfall (BOULANGE et al., 2019), enabling the repeatability of rainfall events, and thus, a better evaluation of the factors that influence the process (ISERLOH et al., 2013).

With the evolution of rainfall simulators, the accuracy of the generated information has increased, especially when using new generation simulators capable of applying rainfall with varying intensities (NIELSEN et al., 2019), reproducing different precipitation patterns. Pérez-Latorre et al. (2010) developed simulators to obtain variable rainfall intensities combining a cone jet nozzle controlled by a solenoid valve and a variation of up to three flat jet nozzles working simultaneously. Although the equipment successfully resembled natural rainfall regarding droplet size and energies, it limited precipitation intensity to the range of 20 to 80 mm h⁻¹.

In Brazil, the *InfAsper* model (ALVES SOBRINHO et al., 2008) has been used in different regions and soil use and management conditions (CARVALHO et al., 2015; PANACHUKI et al., 2015; VALIM et al., 2016; ALMEIDA et al., 2018; MARQUES et al., 2019; MORAES et al., 2019), applying rainfall with a constant pattern, following a previously calibrated rainfall intensity. The equipment has all the necessary characteristics to simulate natural rainfall (MORIN et al., 1967) and is classified as a simulator with pressurized nozzles (ALVES SOBRINHO et al., 2008). Recently, Macedo et al. (2021) developed an electronic device that acts on the frequency inverter of the *InfAsper* control panel, allowing the user to save a text file containing the desired rainfall pattern on a micro-SD memory card. By varying the rotation of the shutter disk during the rainfall application, the authors evaluated the equipment in the laboratory with intensities ranging from 20 to 110 mm h⁻¹ and uniformities for different rainfall patterns higher than those observed with the constant pattern.

When considering isolated precipitation events, intermediate and delayed patterns tend to produce higher runoff rates and soil losses than advanced patterns. The latter is given by the increased moistening of the soil surface layers and consequent lower infiltration capacity when using the simulator to apply the maximum precipitation intensity (CARVALHO et al., 2012). Still, the advanced pattern can lead to significant damage due to the number of occurrences and its ability to saturate certain soil types, leading to severe problems for agriculture and even landslides (CASSOL et al., 2008; CARVALHO et al., 2009; MAZURANA et al., 2009; WANG et al., 2016; BACK & POLETO, 2017; BACK et al., 2018; FAN et al., 2020).

Reproducing rainfall patterns by varying the precipitation intensity is one of the main limitations when using simulators. Therefore, this study evaluated: a) the operability of the *InfAsper* rainfall simulator with the new control panel that varies the precipitation intensity during the rainfall application and b) the soil and water losses associated with different rainfall patterns in a Distrophic Acrisol with a clay loam texture.

3.4 MATERIAL AND METHODS

3.4.1 Characterization of the experimental área

The study was conducted between July and August 2019 in an experimental área located in Seropédica, Rio de Janeiro, Brazil (22° 46' S, 43° 41' W, and an average altitude of 33 m). Several studies with natural and simulated rainfall have been performed in this area (CARVALHO et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2010; CARVALHO et al., 2012; EDUARDO et al., 2013; CARVALHO et al., 2015; ALMEIDA et al., 2019; 2021). Its average slope is 9.0%, and the soil classification corresponds to a Dystrophic Acrisol with a clay loam texture (Table 4). The experiment was carried out in exposed soil conditions.

Table 4. Characteristics of the Dystrophic Acrisol with a clay loam texture of the experimental area.

Horizon	Depth (cm)	Granulometric Composition (%)				
		Sand (2-0.05 mm)	Silt (0.05-0.002 mm)	Clay (<2 μ mm)	Degree of flocculation (%)	Silt/Clay
A	0-16	58	16	26	27	0.58
AB	16-27	50	14	36	19	0.38
BA	27-46	42	14	44	44	0.30
Bt ₁	46-90	46	12	42	77	0.30
Bt ₂	90-117	40	15	45	82	0.33
Bt ₃	117-155+	30	12	58	99	0.21

Source: Almeida et al. (2021).

The total pore volume (TPV), macro and microporosity, and soil density (SD) were evaluated in the 0 - 20 and 20 - 40 cm layers. Additional assessments included mean weight diameter (MWD), mean geometric diameter (MGD), aggregate stability index (ASI), and content of soil organic carbon (SOC) in the 0 - 20 cm layer. All analyses were performed following the methodologies described by Teixeira et al. (2017).

The soil had an average ASI of 83.59%, with MGD and MWD values of 2.82 mm and 3.58 mm, respectively. The average TPV was 0.3626 cm³ cm⁻³ and SD 1.52 g cm⁻³, suggesting good aeration and infiltration given by the soil preparation with plowing and harrowing in the direction of the terrain contour curves. Finally, the mean content of SOC was 16.6 g kg⁻¹. In general, these values indicate adequate soil structure, aeration, and water infiltration in the experimental area.

3.4.2 Soil erosion evaluation under different precipitation patterns

The *InfiAsper* rainfall simulator with the new control panel (MACEDO et al., 2021) (Figure 12a) was used to evaluate the effect of precipitation patterns on soil erosion. Its programming included five precipitation patterns differentiated by the occurrence of the highest intensity (PI): advanced (AD), intermediate (IN), inverted intermediate (II), and delayed (DE) (Figure 12b), besides the constant pattern (CT). Rainfall was simulated with a depth of 30 mm and a duration of 40 min, with PI ranging from 20 to 110 mm h⁻¹. For each pattern, PI alterations followed the variations in the rotation of the shutter disk, which ranged from 140 to 800 rpm, according to equipment's calibration curve (MACEDO et al., 2021). The exception was the CT, for which PI remained at 45 mm h⁻¹.

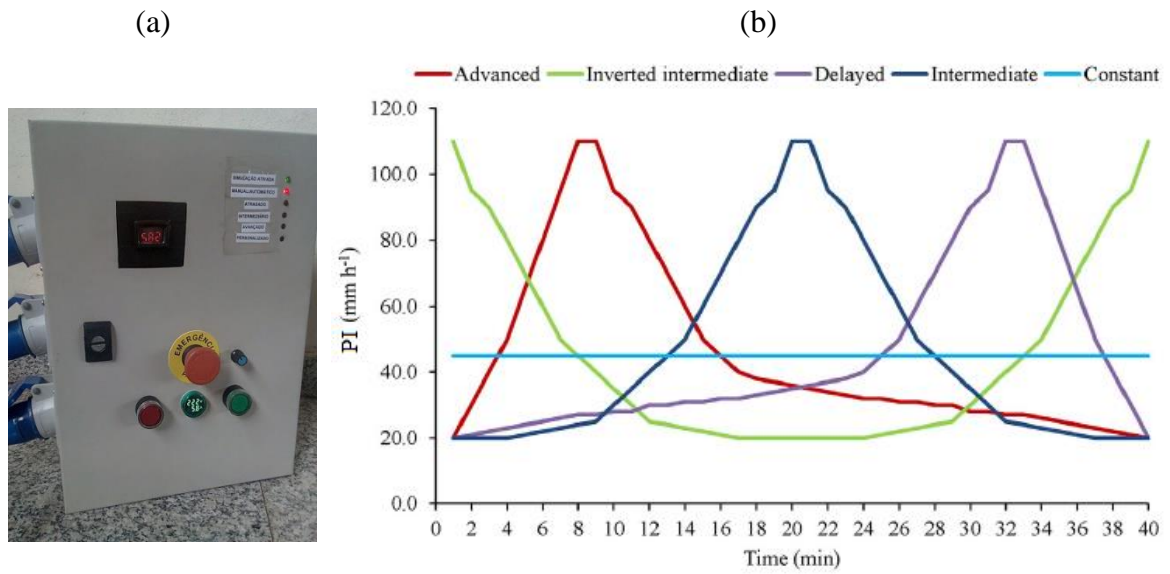


Figure 12. New *InfiAsper* control panel (a) and applied precipitation patterns (b). Source: Macedo et al. (2021).

The equipment was installed according to Alves Sobrinho et al. (2008), with the sprinkler nozzles (model Vejeet 80.150) leveled and positioned 2.30 m from the soil (Figure 2a). A collector measuring 0.70 m² was stuck in the ground in the direction of the terrain slope (Figure 13b). Throughout the tests, water pressure at the nozzles remained at 27.6 kPa and the disc opening at 56 mm (MACEDO et al., 2021). Before each test, the soil was wet to achieve uniform initial humidity conditions of the experimental plots and reduce the time between the beginning of the precipitation and the surface runoff. The wetting was performed close to the surface using a watering can and applying a water depth of approximately 15 mm.



Figure 13. *InfiAsper* model rainfall simulator (a) and collector plot (b).

When the runoff began, it was collected every 1 min and stored in 1.0 L plastic bottles. Once in the laboratory, soil loss was quantified by adding aluminum sulfate (0.018 mol L⁻¹) to

the collected material to promote the sedimentation of the suspended particles. The latter was followed by excess water removal and the drying of the samples in an oven at 105°C until constant weight and the final weighing of the solids from the surface runoff (ALMEIDA et al., 2021). The infiltrated water depth was determined by the difference between precipitation and runoff depths at each measurement interval.

3.4.3 Experimental design and statistical analyses

The experiment was conducted using a randomized block design with five treatments (advanced - AD, intermediate - IN, delayed – DE, inverted intermediate - II, and constant - CT precipitation patterns) and five repetitions per treatment. Data regarding accumulated soil loss (ASL), accumulated runoff depth (ARD), time to start runoff (TSR), runoff ending time (RET), and maximum runoff rate (MRR) were submitted to the Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965) and Bartlett's tests (Bartlett, 1937) to evaluate the fulfillment of the statistical assumptions normality and homogeneity of residuals, respectively. The calculated probability of normality and homogeneity were each $p < 0.866$ and $p < 0.349$ (ASL); $p < 0.5774$ and $p < 0.6973$ (ARD); $p < 0.3625$ and $p < 0.6567$ (TSR); $p < 0.7792$ and $p < 0.1181$ (RET); and $p < 0.5475$ and $p < 0.0630$ (MRR). Data transformation with the log function was only necessary for the RET variable to meet the homogeneity assumption. Once these assumptions were fulfilled, the differences between treatments were verified by variance analysis (F test, $p < 0.05$). When obtaining significant effects of the treatments, these were compared using the Scott-Knott grouping test (SCOTT & KNOTT, 1974), considering a 5% significance level. All statistical analyses were performed using the R language version 4.1.0 (R Core Team, 2021).

The obtained data were also presented in form of relative losses of water and soil as a function of the relative depth applied in order to demonstrate the influence of precipitation patterns in the evolution of the erosive process. For this purpose, the accumulated values of applied depth and soil and water losses evaluated every minute were related to the respective total values obtained, allowing the presentation of relative values ranging from 0 to 1.

3.5 RESULTS AND DISCUSSION

The *InfiaSper* simulator worked well with the new control panel, applying rainfall with varying the precipitation intensity following each programmed pattern, according to the information recorded on the micro-SD memory card and previously calibrated in the laboratory (MACEDO et al., 2021).

3.5.1 Surface runoff

Despite the initial wetting of the experimental plots, there was no surface runoff associated with the simulated rainfall under the CT and II patterns. The combination of rainfall intensity and short duration might have been insufficient to promote soil saturation and, consequently, surface runoff. In the same experimental area, Almeida et al. (2021) obtained low sediment yield ($3.17 \pm 2.13 \text{ g m}^{-2}$) for simulated rainfall lasting 38 min with a constant PI of 75 mm h^{-1} , confirming the reduced erosive effect of constant pattern rainfall. Furthermore, according to Flanagan et al. (1987), in areas with high infiltration capacity, surface runoff occurs only as a result of high precipitation intensity. For the other patterns, time to start runoff (TSR), the runoff ending time (RET), and the maximum runoff rate (MRR) varied with the PI peak (Figure 12b), and their values were significantly different from each other (Table 5). Differences regarding TSR and RET are associated with the PI peaks that characterize the precipitation patterns. On the other hand, MRR values vary according to surface conditions and soil moisture in the superficial layers, which themselves change during rainfall (ELTZ et al., 2001).

Table 5. Mean values and respective standard deviations of the time to start runoff (TSR), the runoff ending time (RET), and the maximum runoff rate (MRR).

Treatment	TSR (min)	RET (min)	MRR (mm h ⁻¹)
Advanced	$7.40 \pm 1.52 \text{ c}$	$22.60 \pm 5.18 \text{ c}$	$24.62 \pm 10.83 \text{ b}$
Intermediate	$16.40 \pm 1.67 \text{ b}$	$38.60 \pm 4.22 \text{ b}$	$46.48 \pm 19.97 \text{ a}$
Delayed	$23.00 \pm 4.69 \text{ a}$	$43.40 \pm 1.82 \text{ a}$	$56.23 \pm 13.13 \text{ a}$

Mean values followed by different letters, in the column, represent significant statistical differences between them ($p < 0.05$).

The MRR in DE pattern was 2.28 times higher than in AD pattern. Flanagan et al. (1987) obtained runoff peaks four to eight times higher when applying maximum PIs at the end of simulated rainfall. According to Alavinia et al. (2019), this variation depends on the soil type, as they verified no differences in the MRR as a function of the rainfall type. These authors applied four simulated rainfall patterns in the laboratory, using two soil types and an experimental bench with a 0.5% slope.

Surface runoff is inversely proportional to soil water infiltration, which itself has its effects affected by rainfall intensity (PARSONS & STONE, 2006). Unlike the classical curves obtained in field tests, infiltration rates follow rainfall intensity (Figure 14), and according to Flanagan et al. (1987), their peaks occur slightly before the maximum runoff rates. The average infiltration rates reached 101.4 , 75.1 and 71.0 mm h^{-1} , respectively, for the AD, IN, and DE patterns, after 8, 20, and 32 min of simulated rainfall, with the maximum *InfiaSper* PI (110 mm h^{-1}). The percentage of macropores in the surface horizon of the experimental area, which was $12.5\% \pm 0.05\%$ within the 0 – 20 cm depth, explain these high infiltration rates. According to Falcão et al. (2020), this is a determinant factor for infiltration under different types of soil management.

As a result of the applied rainfall and the soil water infiltration, surface runoff began when the average rainfall intensities were 80, 60, and 34 mm h⁻¹ for the AD, IN, and DE patterns, respectively, with the MRR occurring after 11, 22 and 34 min of simulated rainfall (Table 5). According to Carvalho et al. (2012), the PI peak of the IN and DE patterns occurs when the superficial soil layers are almost saturated, which, in turn, favors runoff and the erosion process, especially in bare soils. Gao et al. (2018) also highlight the DE and IN precipitation patterns as the most damaging, causing flood peaks. There was an average lag of 2 - 3 min between the infiltration rate peaks and the surface runoff (Figure 14), which might be due to water storage on the soil surface and the concentration time for the runoff within the plot taken to the collection point.

Using the *InfiAsper* simulator, Almeida et al. (2021) quantified surface runoff for rainfall with constant PI higher than 44 mm h⁻¹ after 19.2 min of simulated rainfall. The authors did not evaluate rainfall with intensities lower than 44 mm h⁻¹.

3.5.2 Accumulated losses of water and soil

The accumulated loss of soil and the runoff depth varied according to the simulated rainfall patterns. On average, the lowest values corresponded to the AD pattern (Table 6), accounting for 47,41 and 32,12% of the maximum soil and water accumulated losses. These results indicate a greater influence of the patterns on surface runoff than on soil loss. Dunkerley (2012), Carvalho et al. (2012), and Almeida et al. (2021) reported similar results.

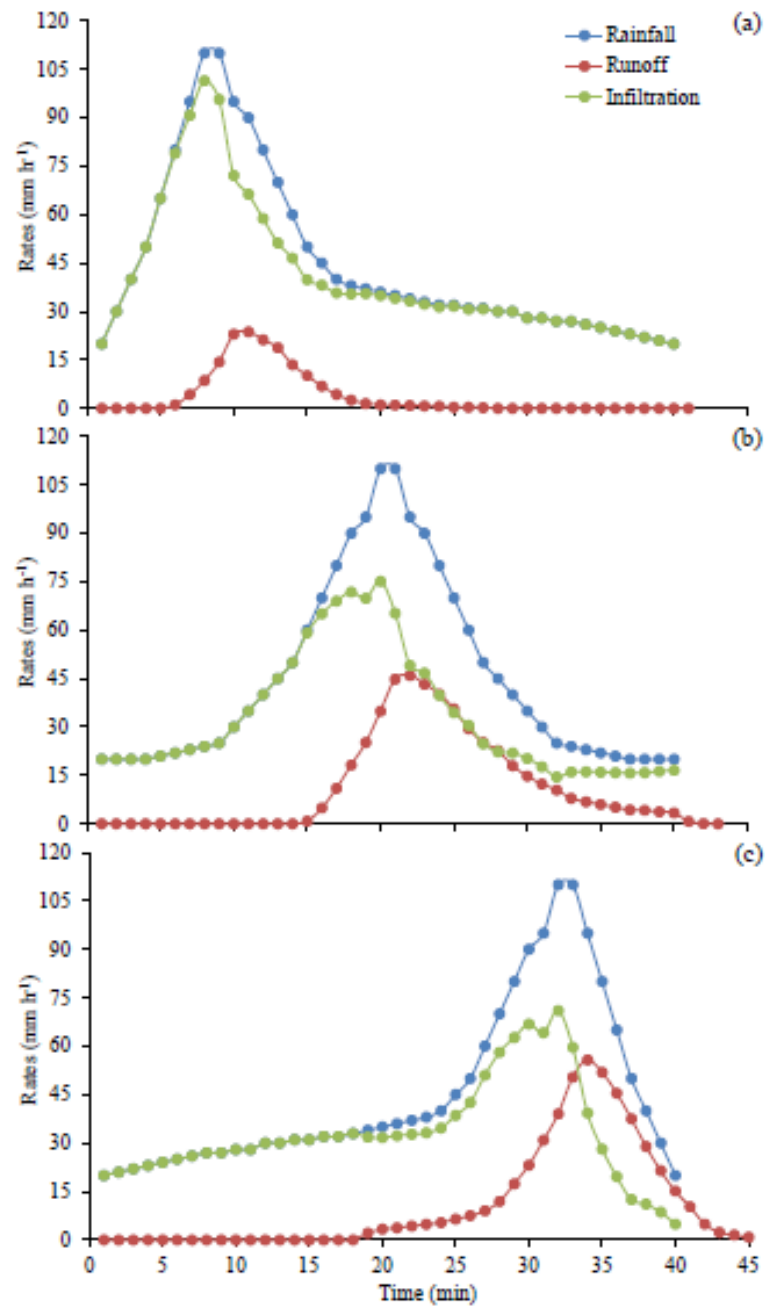


Figure 14. Precipitation intensity and average 206 infiltration and surface runoff rates during simulated rainfall with the AD (a), IN (b), and DE (c) patterns.

Table 6. Mean values and respective standard deviations of accumulated soil loss (ASL) and accumulated runoff depth (ARD).

Treatment	ASL (g m ⁻²)	ARD (mm)
Advanced	3.57 ± 1.08 b	2.65 ± 1.41 b
Intermediate	7.53 ± 2.66 a	8.01 ± 4.33 a
Delayed	6.65 ± 1.28 a	8.25 ± 3.49 a

Mean values followed by different letters, in the column, represent significant statistical differences between them ($p < 0.05$).

Almeida et al. (2021) reported sediment yields lower than those verified in the present study ($3.17 \pm 2.13 \text{ g m}^{-2}$) for simulated rainfall lasting 38 min with a constant PI of 75 mm h^{-1} , confirming the reduced erosive effect of constant pattern rainfall. An et al. (2014) found a 1.13 to 5.17 fold reduction in soil loss under patterns with varying PI. In another study, Alavinia et al. (2019) found that on two different soils, the constant pattern produced on average 94% and 88% of the mean soil loss verified for the pattern with varying IP.

In the same experimental area, Almeida et al. (2019) obtained a maximum soil loss rate of $9.5 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ after 25 min of rainfall with a constant precipitation intensity of 76.5 mm h^{-1} . Using a pendulum simulator, with intermittent rainfall application and soil preparation in the slope direction, Oliveira et al. (2010) verified soil losses of 6.7, 10.8, and 12.5 g m^{-2} for the advanced, intermediate, and delayed patterns, respectively. These values are 40, 61, and 107% higher than those found in this study, evidencing the influence of land preparation on the erosive process.

The higher soil loss in the IN and DE patterns confirms the hypothesis that these patterns provide high erosion potential per event (Wang et al., 2016; Back & Poletto, 2017). Considering the conditions of the experiment, the time of the PI peak within the IN pattern might have favored particle carryover by the runoff. Given the soil moisture conditions before rainfall application and the kinetic energy of the droplets generated by the simulator, the impact of the droplets on the soil causes the sealing of the surface layer and might promote runoff (Zambon et al., 2021). In the *InfiAsper* simulator, the kinetic energy ranged from 17.82 to $23.73 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ and can be defined by rotation control up to a safety limit of 800 rpm capable of promoting drops in known sizes, whose D_{50} (mean diameter of 50% of the precipitated drops) varies between 1.45 and 2.20 mm (Macedo et al., 2021), which is suficiente to promote runoff at PI peaks. In soils with fine granulometry, especially when lacking cover, surface sealing intensifies the erosive process. Intense rainfall disaggregates particles, clogging the pores and decreasing infiltration (Vaezi et al., 2017; Hamanaka et al., 2019). Additionally, after applying PI peaks, high variability in runoff was observed, corroborating the effect of soil moisture on runoff formation.

Data regarding laboratory simulated rainfall suggest that the moment at which the PI peak occurs significantly affects water erosion (Wang et al., 2017). Alavinia et al. (2019) and Dunkerley (2020) confirmed this significant effect, reporting runoff rates, on average 5.7 times higher in the delayed pattern than in the advanced one. Analyzing soil erosion under natural rainfall, Huo et al. (2020) indicate that events with high PI and short durations favor soil particle carryover.

Carvalho et al. (2009) observed natural precipitation events that promoted 62.6, 11.8, and 25.6% of water loss and 35.1, 6.6, and 58.3% of soil loss in the AD, IN, and DE patterns, respectively. Thus, the highest erosion potential corresponded to the DE pattern, contrasting with the fact that the rainfalls of the AD pattern provided the highest erosion rates in the period (75.9%). These results reinforce the need to consider rainfall patterns when studying the process of water erosion.

3.5.3 Water and soil relative losses as a function of the applied and runoff depths

The relative losses of water and soil as a function of the relative depth applied (Figure 15a and 15b) in each treatment (AD, IN, and DE) demonstrate the influence of precipitation patterns in the evolution of the erosive process. Half of the water loss occurs after applying approximately 45, 65, and 80% of the total depth. On the other hand, 50% of the soil loss occurs when around 48, 70, and 80% of the total depth is applied. These results confirm that the rainfalls with delayed patterns are more erosive than the advanced e intermediate patterns, according to Carvalho et al. (2019) and Huo et al. (2020).

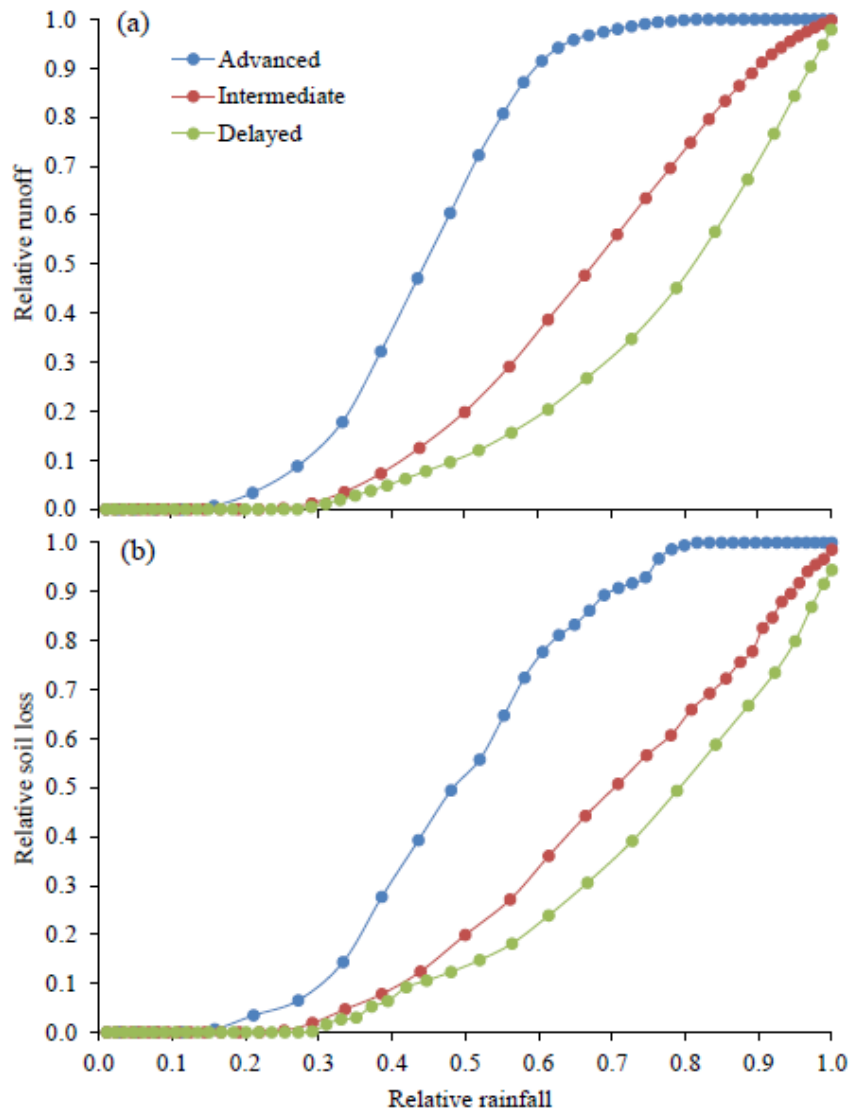


Figure 15. Relative surface runoff (a) and relative soil loss (b) as a function of the relative depth applied in advanced, intermediate, and delayed precipitation patterns.

There was less relative soil loss than runoff in AD and IN patterns (Figure 16). Soil loss was proportionally smaller than the relative runoff along the rainfall characterized by an AD pattern, as opposed to the DE pattern, where the soil loss was greater than the water loss until the occurrence of 65% of the runoff. Therefore, for 50% of the soil loss to occur, 65, 56, and 47% of the runoff must occur for the AD, IN, and DE patterns, respectively. This result suggests that compared to the other precipitation patterns, in the DE pattern, soil loss is more influenced by the droplet impact on the soil and surface conditions than by runoff. Thus, each precipitation pattern provides specific erosive characteristics and differently impacts soil degradation.

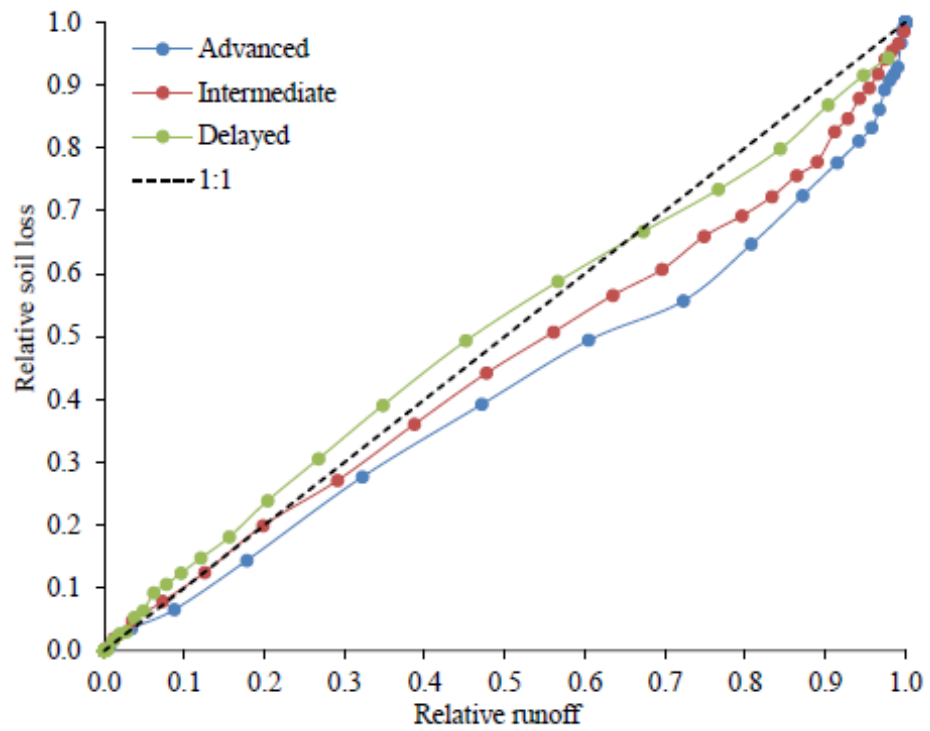


Figure 16. Relative soil loss as a function of relative runoff for advanced, intermediate, and delayed precipitation patterns.

3.6 CONCLUSION

The *InfiAsper* simulator modified to apply customized rainfall patterns allows varying the rainfall intensity and obtaining satisfactory results in the field and information consistent with the expected characteristics of natural rainfall patterns.

Intermediate and Delayed rainfall patterns produce higher soil and water losses than the Advanced pattern.

The constant and inverted intermediate rainfall patterns do not generate significant losses for when applying an average water depth of 30 mm.

3.7 REFERENCES

- ALAVINIA M.; SALEH F. N.; ASADI H. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion. **International Journal of Sediment Research**, v.34, n.3, p.270-278, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.11.001>.
- ALMEIDA, W. S.; CARVALHO, D. F.; PEREIRA, F. A. C.; ROUWS, J. R. C. Sediment production and soil water infiltration under different simulated rainfall characteristics. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.8, p.572-578, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n8p572-578>.
- 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 & Tillage Research**, v.175, p.130-138, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>.
- ALMEIDA, W. S.; SEITZ, S.; OLIVEIRA, L. F. C.; 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, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.10.004>.
- ALVES SOBRINHO, T., GOMEZ-MACPHERSON, H., GÓMEZ, J. A. A portable integrated rainfall and overland flow Simulator. **Soil Use and Management**, v.24, n.2, p.163-170, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00150.x>.
- AN, J.; ZHENG, F. L.; HAN, Y. Effects of rainstorm patterns on runoff and sediment yield processes. **Soil Science**, v. 179, p. 293-303, 2014. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000068>.
- BACK, A. J.; ALBERTON, J. V.; POLETO, C. Erosivity Index and Characteristics of Erosive Rainfall from the Far Western Region of Santa Catarina, Brazil. **Journal of Environmental Engineering**, v. 144, n. 7, p. 1-12, 2018. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001388](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001388).
- BACK, A. J.; POLETO, C. Análise dos padrões de distribuição temporal e característica das chuvas erosivas de Florianópolis-SC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 488-508 2017. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v21i0.49019>.
- BARTLETT, M. S. (1937). Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Society of London*, 160, 268e282. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109>.
- BORRELLI, P.; MEUSBURGUER, K.; BALLABIO, C.; PANAGOS, P.; ALEWELL, C. Object-oriented soil erosion modelling: A possible paradigm shift from potential to actual risk assessments in agricultural environments. **Land Degradation & Development**. v.29, p.1270-1281, 2018. <https://doi.org/10.1002/ldr.2898>.
- BOULANGE, J.; MALHAT, F.; JAIKAEW, P.; NANKO, K.; WATANABE, H. Portable rainfall simulator for plot-scale investigation of rainfall-runoff, and transport of sediment and pollutants. **International Journal of Sediment Research**, v.34, p.38-47, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.08.003>.

CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S.; PINTO, M. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M. Características da chuva e perdas por erosão sob diferentes práticas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 13, p.3-9, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000100001>.

CARVALHO, D. F.; EDUARDO, E.N.; ALMEIDA, W.S.; SANTOS, L.A.F.; ALVES SOBRINHO, T. Hydric erosion and water infiltration in different soil management system and corn development stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Impresso)**, v. 19, p. 1076-1082, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1072-1078>.

CARVALHO, D. F.; SOUZA, W. J.; PINTO, M. F.; OLIVEIRA, J. R.; GUERRA, J. G. M. Perdas de água e solo sob diferentes padrões de chuva simulada e condições de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, v.32, n.4, p.708-717, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000400010>.

CASSOL, E. A.; ELTZ, F. L. F.; MARTINS, D.; LEMOS, A. M.; LIMA, V. S.; BUENO, A. C. Erosividade, padrões hidrológicos, período de retorno e probabilidade de ocorrência das chuvas em São Borja, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p.1239-1251, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300032>.

CONNOLLY, R. D.; SILBURN, D. M.; CIESIOLKA, C. A. A.; FOLEY, J. L. Modelling hydrology of agricultural catchments using parameters derived from rainfall simulator data. **Soil & Tillage Research**, v. 20, p. 33-44, 1991. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90123-F](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90123-F).

DUNKERLEY, D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: Rainfall simulation on dry land soils. **Hydrological Processes**, v.26, p.2211-2224, 2012. <https://doi.org/10.1002/hyp.8317>.

EDUARDO, E. N.; CARVALHO, D. F.; MACHADO, R. L.; SOARES, P. F. C.; ALMEIDA, W. S. Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em Argissolo Vermelho-amarelo, sob condições de chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 796-803, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300026>.

ELTZ, F. L. F.; MEHL, H. U.; REICHERT, J. M. Perdas de solo e água em entressulcos em um argissolo vermelho-amarelo submetido a quatro padrões de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 485-493, 2001. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832001000200024>.

FALCÃO, K. S.; PANACHUKI, E.; MONTEIRO, F. N.; MENEZES, R. S.; RODRIGUES, D. B. B.; SONE, J. S.; OLIVEIRA, P. T. S. Surface runoff and soil erosion in a natural regeneration area of the Brazilian Cerrado. **International Soil and Water Conservation Research**. v.8, p. 124-130, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.04.004>. FAN, L.; LEHMANN, P.; ZHENG, C; OR, D. Rainfall Intensity Temporal Patterns Affect Shallow Landslide Triggering and Hazard Evolution. **Geophysical Research Letter**, v.47, n.1, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019GL085994>.

FAN, L.; LEHMANN, P.; & ZHENG, C. O. R. D. Rainfall Intensity Temporal Patterns Affect Shallow Landslide Triggering and Hazard Evolution. **Geophysical Research Letter**, v.47, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019GL085994>.

FLANAGAN, D. C.; FOSTER, G. R.; MOLDENHAUER, W. C. Storm pattern effect on infiltration, runoff and erosion. **Transactions of ASAE**, v.31, p.414-420, 1987. <https://doi.org/10.13031/2013.30724>.

GAO, J.; KIRKBY, M.; HOLDEN, J. The effect of interactions between rainfall patterns and land-cover change on flood peaks in upland peatlands. **Journal of Hydrology**, v.567, p.546-559, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.039>.

HAMANAKA, A.; SASAOKA, T.; SHIMADA, H.; MATSUMOTO, S. Experimental study on soil erosion under different soil composition using rainfall simulator. **Plant, Soil and Environment**, v.65, p.181-188, 2019. <https://doi.org/10.17221/68/2019-PSE>.

HUO, J.; YU, X.; LIU, C.; CHEN, L.; ZHENG W.; YANG, Y.; TANG, Z. Effects of soil and water conservation management and rainfall types on runoff and soil loss for a sloping area in North China. **Wiley**. V. 31, p. 2117-2130, 2020. <https://doi.org/10.1002/ldr.3584>.

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.J., LÁZARO^J, R., LEÓN, F.J., MARTÍNEZ-MENA, M., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., MARZEN, M., WIRTZ, S., 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. **Catena**. 110, 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013>.

KRUSKAL, W. H., WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American Statistical Association**, v.47, p.583-621, 1952. <https://doi.org/10.2307/2280779>.

MACEDO, P. M. S., PINTO, M. F., ALVES SOBRINHO, T., SCHULTZ, N., COUTINHO, T. A. R., CARVALHO, D. F. A Modified portable rainfall simulator for soil erosion assessment under different rainfall patterns. **Journal of Hydrology**, 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. (2019). USLE K-factor method selection for a tropical catchment. **Sustainability**, 1, 2-17. <https://doi.org/10.3390/su11071840>.

MAZURANA, J., CASSOL, E. A., SANTOS, L. C., ELTZ, F. L., & BUENO, A. C. (2009). Erosividade, padrões hidrológicos e período de retorno de chuvas erosivas de Santa Rosa (RS). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13, 975-983. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700021>.

MORAES, A. G. L., CARVALHO, D. F., ANTUNES, M. A. H., CEDDIA, M. B.; FLANAGAN, D. F. (2019). Steady infiltration rate spatial modeling from remote sensing data and terrain attributes in Southeast Brazil. **Geoderma Regional**, 20, e00242. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00242>.

MORIN, J., GOLDBERG, D., & SEGNER, I. (1967). A rainfall simulator with rotating disk. **Trans. ASAE**, 10 (1), 74-77. <https://doi.org/10.13031/2013.39599>.

NIELSEN, K. T.; MOLDRUP, P.; THORND AHL, S.; NIELSEN, J. E.; DUUS, L. B.; RASMUSSEN, S. H.; UGGERBY, M.; RASMUSSEN, M. R. Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. **Hydrological Processes**, v.33, p.3364-3377, 2019. <https://doi.org/10.1002/hyp.13563>.

OLIVEIRA, J.R., PINTO, M.F., SOUZA W.J., GUERRA, J.G.M., CARVALHO, D. F. Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, p.140-147, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000200004>.

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

PARSONS, A. J.; STONE, P. M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. **Catena**, v.67, p.68-78, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.002>.

PÉREZ-LATORRE, F. J.; CASTRO, L.; DELGADO, A. A comparison of two variable intensity rainfall simulators for runoff studies. **Soil & Tillage Research**, v. 107, p. 11-16, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.12.009>.

R Core Team. (2018). **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v.52, p.591-611, 1965. <https://doi.org/10.2307/2333709>.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v.30, p.507-512, 1974. <https://doi.org/10.2307/2529204>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª edição. Brasília, DF: Embrapa, p.573, 2017.

VAEZI, A. R.; AHMADI, M.; CERDÀ, A. Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. **Science of The Total Environment**, v.583, p.382-392, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.078>.

WANG, B.; STEINER, J.; ZHENG, F.; GOWDA, P. Impact of rainfall pattern on interrill erosion process. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 42, p. 1833-1846, 2017. <https://doi.org/10.1002/esp.4140>.

WANG, W.; YIN, S.; XIE, Y.; LIU, B.; LIU, Y. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall. **Catena**, v. 141, p. 56-65, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.019>.

ZAMBON, N.; JOHANNSEN, L. 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, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104827>.

4. CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR PARA AVALIAÇÃO AUTOMÁTICA DA ENXURRADA EM ESTUDOS COM CHUVA SIMULADA

4.1 RESUMO

Diante das dificuldades relacionadas à coleta e avaliação de dados em campo, o desenvolvimento de um coletor que mensure de forma automática o volume e a quantidade de solo e resíduos transportados pela enxurrada, contribui significativamente para estudos na área de manejo e conservação do solo e da água. No presente estudo foi desenvolvido um coletor para testes com chuva simulada, capaz de quantificar o volume de enxurrada e estimar a perda de solo em tempo real, com base em um sistema de medição de volume (sensores de pressão ou capacitivo) e sensores de turbidez. A seleção dos sensores foi baseada nos seus desempenhos, avaliados pela incerteza tipo A, calculada a partir de 30 repetições realizadas com diferentes volumes de água e concentrações de sedimentos de solo. Foi também avaliada a robustez da calibração e o programa desenvolvido, e utilizado em um microcontrolador Arduino Mega® 2560. Usando cartão micro SD, a programação desenvolvida possibilitou o registro do volume, concentração de sedimentos e o tempo de ocorrência das coletas, correspondentes, aproximadamente, a cada 200 cm³ de enxurrada. Os sensores de pressão (PSI.420) e de turbidez (ST100) foram selecionados para o desenvolvimento do protótipo que foi avaliado em campo com o simulador de chuvas *InfiAsper*. Os dados coletados automaticamente foram comparados aos obtidos de forma tradicional. A partir do ensaio de campo foi possível constatar que o método de calibração do sensor de turbidez influencia na incerteza dos resultados. Apesar disso, observamos erros médios de apenas 12,25% na determinação do volume e de 13,16% na perda de solo. O protótipo de coletor apresentou resultados promissores sendo considerado uma ferramenta adequada na obtenção de dados em campo com simuladores de chuva.

Palavra-chave: Erosão Hídrica. Medição de Volume. Perdas de Solo.

4.2 ABSTRACT

In view of the difficulties related to the collection and evaluation of data in the field, the development of a collector that automatically measures the volume and amount of soil and residues transported by the runoff, contributes significantly to studies in the area of soil and water management and conservation. In the present study, a collector was developed for tests with simulated rain, capable of quantifying the runoff volume and estimating the soil loss in real time, based on a volume measurement system (pressure or capacitive sensors) and turbidity sensors. The selection of sensors was based on their performance, evaluated by type A uncertainty, calculated from 30 repetitions performed with different volumes of water and soil sediment concentrations. The robustness of the calibration and the program developed, and used in an Arduino Mega® 2560 microcontroller, were also evaluated. Using a micro SD card, the developed programming made it possible to record the volume, sediment concentration and the time of occurrence of the corresponding collections, approximately, for every 200 cm³ of runoff. Pressure (PSI.420) and turbidity (ST100) sensors were selected for the development of the prototype, which was evaluated in the field with the *InfiAsper* rainfall simulator. The data collected automatically were compared to those obtained in a traditional way. From the field test it was possible to verify that the turbidity sensor calibration method influences the uncertainty of the results. Despite this, we observed average errors of only 12.25% in volume determination and 13.16% in soil loss. The collector prototype showed promising results and is considered an adequate tool for obtaining data in the field with rain simulators.

Keywords: Water Erosion. Volume Measurement. Soil Losses.

4.3 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos e a facilidade de obtenção de dispositivos eletrônicos têm impulsionado as pesquisas e o desenvolvimento de equipamentos em diversas áreas da ciência (GRANDO et al., 2021; KUMAR et al., 2021; MACEDO et al., 2021; ZHAN et al., 2021). O uso de dispositivos para avaliação de processos erosivos torna-se relevante, a começar pelos simuladores de chuva, criados a partir da década de 30 (ISERLOH et al., 2013; NIELSEN et al., 2019; SALEM & MESELHY, 2020).

Aos simuladores de chuva é atribuída uma grande importância devido às inúmeras informações úteis geradas, principalmente referente ao total de perda de solo, que embasam técnicas de uso e manejo dos solos que contribui com a sustentabilidade da produção agrícola em âmbito global (AKSOY et al., 2012; ISERLOH et al., 2013). Um dos grandes desafios quanto ao uso dos simuladores de chuva é a obtenção dos dados de escoamento superficial e de perda de solo provenientes das coletas em campo e o posterior processamento em laboratório. Nesse contexto, o erro humano e o procedimento trabalhoso de coleta reduzem a expansão dos estudos neste campo. Comumente a obtenção dos dados com simuladores é demorada e pouco prática, devido à necessidade de armazenar o volume escoado em um grande número de recipientes, além do tempo de laboratório necessário para quantificação da perda de solo (ALMEIDA et al., 2021).

A obtenção dos dados a partir dos simuladores de chuvas depende de procedimentos repetitivos que podem ser automatizados. Dessa forma, o uso de um coletor que possibilita a medição automática facilitaria o procedimento e reduziria o tempo de obtenção dos dados, reduzindo os custos e a demanda de mão-de-obra. Os dados de enxurrada gerados a partir da chuva simulada representam o volume de água escoado superficialmente e a perda de solo associada às condições de manejo e cobertura do solo, caracterizando o objetivo de boa parte das pesquisas nessa área do conhecimento (SEITZ et al., 2018; ALMEIDA et al., 2019; CERDÀ et al., 2019; ALMEIDA et al., 2021). Dentre as possibilidades de obtenção de dados de volumes de maneira automática destaca-se o uso de sensores de pressão e capacitivos, além dos turbidímetros, destinados à determinação da quantidade de sedimento na enxurrada (GIPPEL, 1989; LANDERS & STURM, 2013; MERTEN et al., 2014; MUTTER, 2018; XU et al., 2020). A partir da integração de tais sensores, de um microcontrolador e da programação adequada é possível desenvolver um coletor de enxurrada com medição automatizada para suprir a demanda dos simuladores de chuvas. A integração destes componentes a fim de facilitar a obtenção de dados em estudos a respeito da erosão hídrica caracteriza a inovação no presente trabalho, uma vez que a arquitetura proposta para ser aplicada em simuladores de chuva é inédita, possibilitando também adaptações em estudos com chuva natural.

Embora existam pesquisas na área de desenvolvimento de coletores de enxurrada (ZHAN et al., 2021), não existe um modelo específico para uso em campo que menssure e armazene o volume de escoamento e a perda de sedimentos em testes com chuva simulada.

O objetivo deste estudo foi desenvolver e avaliar um protótipo de coletor/analizador automático da enxurrada, capaz de quantificar o seu volume e estimar a perda de solo em tempo real em ensaios de campo com chuva simulada. Para tal, foram testados sensores com diferentes princípios de funcionamento a fim de obter um protótipo confiável para uso em campo.

4.4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.4.1 Construção do protótipo

O protótipo é baseado em um recipiente cilíndrico que armazena e mensura o volume de enxurrada, e possibilita estimar a perda de solo a partir de um sensor de turbidez. Para a medição do volume escoado foram avaliados dois transdutores de pressão (modelos MPX5010Dp e PSI.420 A5 50MBAR 12N) e um sensor capacitivo que vem sendo desenvolvido por nosso grupo de pesquisa. Os sensores de pressão foram avaliados a partir da variação do nível da água no interior da estrutura coletora, que pressiona o ar contra o elemento sensível, enquanto no sensor capacitivo, a mensuração é direta pelo contato do sensor com o nível de água coletado.

A estrutura do protótipo foi desenvolvida com tubos de PVC (Figura 17), que é um material de fácil obtenção e de baixo custo.



Figura 17. Protótipo do coletor automático de enxurrada com suporte de instalação de campo em vista externa (A) e vista interna mostrando o posicionamento dos sensores para mensurar o volume (1B) e a perda de solo (2B).

O protótipo foi desenvolvido para realizar leituras consecutivas de até 200 cm³ de volume escoado, quando o software embarcado aciona a leitura do sensor de turbidez, registra as informações da enxurrada em um cartão micro SD e abre a válvula instalada na base da estrutura coletora, permitindo a drenagem do material escoado. Assim, o registro das leituras é variável e ocorre em função da quantidade de enxurrada produzida pela chuva simulada. Para o desenvolvimento do equipamento foi previsto o uso de um Arduino Mega® 2560 para controle de todo processo, um módulo SD, um cartão de memória de 16 Gb, dois módulos relés e duas solenoides de ação direta para o controle da entrada e saída da enxurrada, um sensor para leitura do volume de enxurrada e um para leitura da turbidez, um display LCD para visualização dos dados em tempo real, interruptores para acionar e desligar o sistema e fontes de alimentação para energizar os componentes (Figura 18).

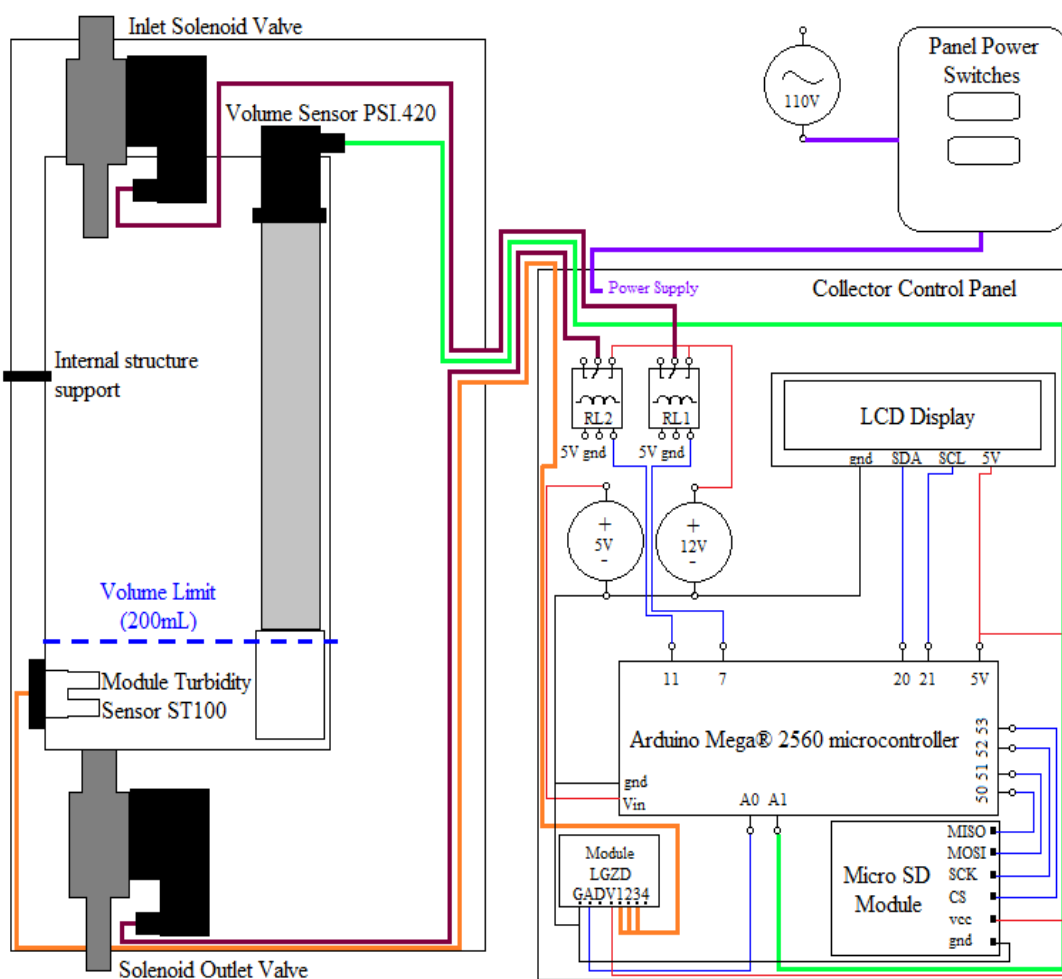


Figura 18. Esquema interno do protótipo, indicando o posicionamento dos sensores, esquema estrutural do coletor e configuração elétrica do painel controlador.

4.4.2 Avaliação da incerteza de medição e calibração dos sensores

A comparação e avaliação dos sensores utilizados no protótipo se embasaram na avaliação de desempenho quanto a calibração (comparando os dados reais aos calculados a partir de modelos gerados por regressão) e a incerteza tipo A, determinada pela Equação 3.

$$u(x_i) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Em que:

- u – é a incerteza do tipo A (adimensional);
- n – número de repetições (adimensional);
- s – desvio padrão (adimensional).

Para a obtenção da incerteza tipo A e das curvas de calibração dos sensores foram realizados 30 testes com água sem resíduos sólidos, para volumes variando de 0 a 1200 cm³, com incrementos de 50 cm³, sendo o maior volume correspondente à capacidade máxima do coletor, que foi definida a partir de dados coletados em campo, utilizando o simulador de chuvas modelo *InfAsper* (ALVES SOBRINHO et al., 2008).

O sensor capacitivo utilizado foi produzido a partir de chapa fenolite dupla face protegida com resina e alimentado com 5V. As suas leituras foram realizadas por meio de rotina específica desenvolvida a partir do valor de capacitância gerado pelo contato do sensor com a água.

As leituras dos transdutores de pressão foram efetuadas pela porta analógica (porta com conversor antológico-digital) do Arduino, sendo a pressão correspondente à pressão do ar comprimido pela coluna no interior do tubo de 20 mm ao qual os transdutores foram acoplados. Esse procedimento foi adotado para evitar entupimentos e degradação do sensor ao entrar em contato com a água e partículas em suspensão.

Para averiguar a melhor maneira de calibrar o sensor de turbidez (modelo ST100) a fim de atender a demanda do coletor, propusemos dois métodos a partir de amostras de solo extraídas da área em que o coletor foi testado posteriormente.

O primeiro, denominado SR (Simulated Runoff), consistiu em produzir amostras de enxurrada em laboratório, peneirando o solo coletado na área experimental em uma malha de 500 μm e depois fazendo as diluições e homogeneização em 200 cm^3 de água, obtendo-se as concentrações de 0; 0,7; 1,93; 3,16; 4,39; 5,00 g m^{-2} . Foram realizadas 15 repetições para cada diluição, sendo inserido o sensor na amostra para a obtenção da leitura.

No segundo método, denominado CR (Collected Runoff), 40 amostras de enxurrada de 200 cm^3 foram coletadas diretamente em campo com o simulador a partir de uma única parcela experimental sobre a qual chuvas foram aplicadas com intensidades de precipitação (IP) de 30, 45, 60 e 75 mm h^{-1} , a fim de representar da melhor maneira possível as condições em que o sensor deve funcionar no coletor (Figura 19). Para cada IP foram realizadas 10 repetições. A calibração foi gerada diretamente, por meio da regressão de dados do turbidímetro (0 - 5V) em relação a perda de solo de cada amostra obtida pelo método gravimétrico.

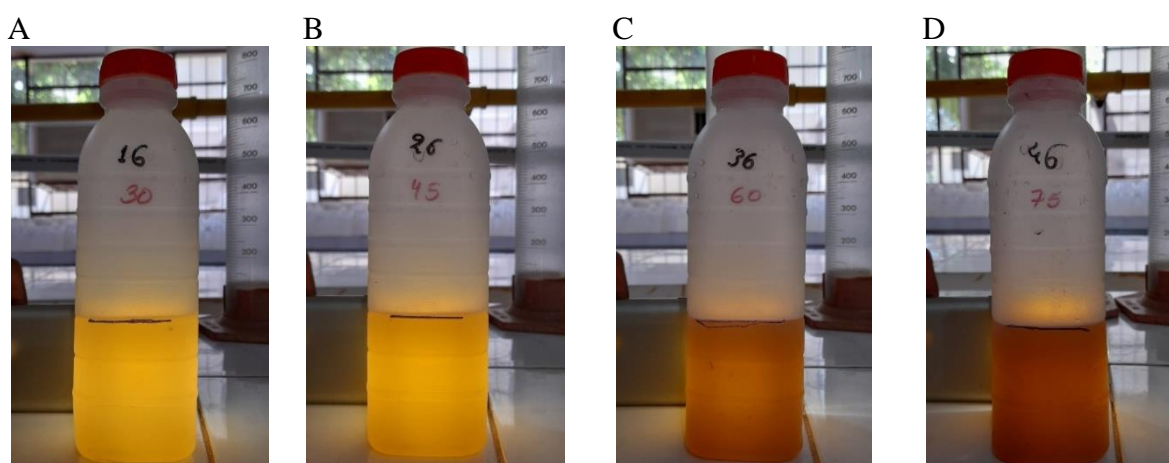


Figura 19. Amostras de enxurrada representativas das intensidades de precipitação de 30 (A), 45 (B), 60 (C) e 75 mm h^{-1} (D) aplicadas pelo simulador de chuvas em campo.

As amostras foram levadas ao laboratório onde foram realizadas três repetições de leituras dos dados pelo sensor ST100, totalizando 30 repetições ao todo para cada IP aplicada. Em sequência as amostras foram secas em estufa e pesadas para se obter as perdas de solo de cada amostra. As perdas de solo médias relativas às IPs aplicadas e utilizadas na confecção da calibração foram de 0,1454; 0,2021; 0,3084; e 0,3787 g m^{-2} . Para as duas metodologias, as curvas de calibração foram obtidas por meio de regressão linear entre a leitura do sensor (variável independente) e a concentração de sólidos em suspensão.

A funcionalidade do sensor de turbidez para o protótipo coletor foi avaliada a partir dos mesmos princípios empregados para os sensores de volume, por meio da curva de calibração e da incerteza tipo A. A opção em fazer a calibração do sensor de turbidez baseado diretamente em dados de enxurrada gerada em campo se deve à dificuldade em reproduzir uma enxurra artificial com as mesmas condições das amostras produzidas por testes com simulador de chuvas.

Sequencialmente, as curvas de calibração geradas a partir dos sensores selecionados para a confecção do primeiro protótipo do coletor foram adicionadas à programação do microcontrolador integrado no coletor o qual foi submetido a um ensaio preliminar a nível de campo, visando avaliar a sua eficácia e robustez.

Em seguida, as curvas de calibração dos sensores selecionados para a confecção do coletor foram adicionadas à programação do microcontrolador integrado e visando avaliar sua eficácia e robustez, o protótipo foi avaliado em campo na mesma área experimental onde as amostras foram coletadas para a calibração do sensor de turbidez.

4.4.3 Protótipo de coletor de enxurrada

Para melhor aproveitamento dos dados de enxurrada, o coletor foi desenvolvido para operar com volumes conhecidos ao invés tempos de coleta pré-fixados, o que tornaria o processo de programação mais complexo e o sistema mais sujeito aos erros de leitura para diferentes volumes coletados (Figura 20). O volume de 200 cm³ foi adotado para aferição das leituras e armazenamento de dados e equivale à altura mínima para que a enxurrada coletada cubra por completo o sensor de turbidez. Uma arquitetura de coletor de enxurrada semelhante é apresentada por Zhan et al. (2021).

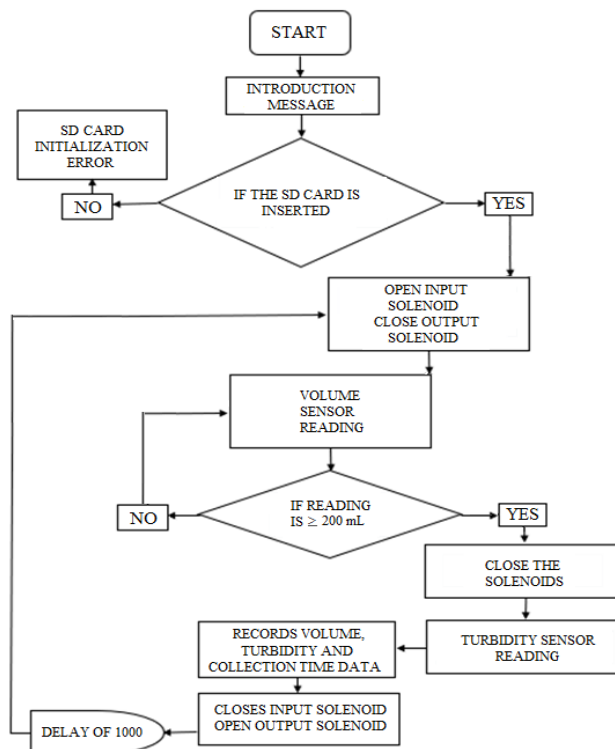


Figura 20. Fluxograma da programação utilizada no protótipo do coletor de enxurrada para leituras realizadas considerando um volume pré-definido de 200 cm³.

4.4.4 Avaliação em campo e análise de custo-benefício

A avaliação do coletor automático em campo a partir de chuvas simuladas pelo *InfiAsper* (ALVES SOBRINHO, 2008; MACEDO et al., 2021) foi realizada a partir de ensaios realizados em um Argissolo Vermelho-Amarelo situado em uma área experimental na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. O solo foi preparado com uma aração e duas gradagem no sentido das curvas de nível do terreno. No momento da instalação da parcela foi realizado um nivelamento manual para que a parcela ficasse posicionada a $0,09 \text{ m m}^{-1}$ de declividade, padronizando as condições iniciais do terreno.

Foi simulada uma chuva com IP constante de 45 mm h^{-1} e 40 min de duração, sendo as coletas automáticas realizadas até o término do escoamento superficial. Antes do teste foi realizado um umedecimento prévio, buscando uniformizar as condições iniciais de umidade sob a parcela experimental, seguindo os procedimentos comumente utilizados em testes com simuladores de chuva (ANACHE et al., 2014; PANACHUKI et al., 2015). A exemplo de Carvalho et al. (2021), foi simulada uma chuva com IP constante de 45 mm h^{-1} e 40 min de duração, sendo coletado todo o volume escoado ao longo das simulações.

Os dados de escoamento e perda de solo coletados automaticamente foram comparados com dados obtidos pela análise laboratorial, sendo calculados o erro e o desvio padrão. A análise manual conduzida em laboratório consistiu em mensurar o volume da enxurrada coletada com auxílio de uma proveta graduada de 500 cm^3 , enquanto a perda de solo foi obtida a partir do método gravimétrico com adição de agente precipitante (Sulfato de Alumínio 3%). O material de solo presente em cada amostra foi em seguida seco em estufa de circulação forçada a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingir massa constante. O material seco foi pesado em uma balança analítica com resolução de quatro casas decimais (método gravimétrico). A perda de solo em g m^{-2} foi calculada dividindo a massa do material pela área efetiva da parcela experimental ($0,70 \text{ m}^2$).

Por fim uma análise dos custos para desenvolvimento do protótipo assim como suas principais limitações e benefícios foi realizada baseado no estágio de desenvolvimento em que o equipamento se encontra.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Avaliação dos sensores aplicados na determinação de volume

As incertezas obtidas nos testes com os sensores para avaliar o nível de enxurrada no coletor são apresentadas na Tabela 7. Para o PSI.420, os resultados sugerem precisão em torno de 0,05% para a faixa de leitura de 0 a 50 mbar, como consta nas especificações técnicas do sensor.

Tabela 7. Resultado das incertezas obtidas pelos sensores testados para obter os dados de volume no coletor de enxurrada.

Volume (cm ³)	Incerteza Type A (cm ³)		
	PSI.420	Sensor capacitivo	MPX5010Dp
50	0,4763	2,0772	5,4854
100	0,1334	2,4792	4,4796
150	0,1905	2,5889	4,0028
200	0,1440	3,0690	1,9410
250	0,1428	2,9609	8,4474
300	0,2458	3,4375	2,6457
350	0,0899	3,6971	2,7264
400	0,1192	3,8166	6,9278
450	0,2496	3,7463	8,5407
500	0,1277	5,1682	4,3282
550	0,1029	5,7273	5,0693
600	0,1606	5,5379	4,2464
650	0,1176	7,5658	5,2537
700	0,2747	8,7422	10,0691
750	0,1992	9,5951	2,9899
800	0,2927	10,7440	5,0321
850	0,1430	11,1199	6,3141
900	0,2093	12,3729	5,5581
950	0,1585	-	3,6899
1000	0,1514	-	3,7053
1050	0,0929	-	5,3464
1100	0,1249	-	5,1807
1150	0,1705	-	1,6199
1200	0,1581	-	4,0381
Média	0,1781	5,8026	4,9016

Obs.: Os dados com o sensor capacitivo foram obtidos até volumes de 900 cm³ devido ao tamanho do sensor em relação ao recipiente utilizado na estrutura do reservatório do coletor.

A incerteza tipo A obtidas em função das leituras do sensor de pressão (média de 0,171 cm³) também demonstra a sua capacidade em repetir sua resposta para os mesmos valores de volume real aplicados.

Os valores médios da incerteza tipo A foram de 4,9016 e de 5,8026 cm³, para os sensores de pressão (MPX5010DP) e capacitivo, respectivamente. Os dados apresentados apontam para o PSI.420 como a melhor escolha em função de apresentar baixas incertezas em todos os volumes testados se comparado aos demais sensores avaliados.

A curva de calibração geral do transdutor industrial PSI.420 indica ajuste adequado das leituras do sinal aos volumes coletados (Figura 21).

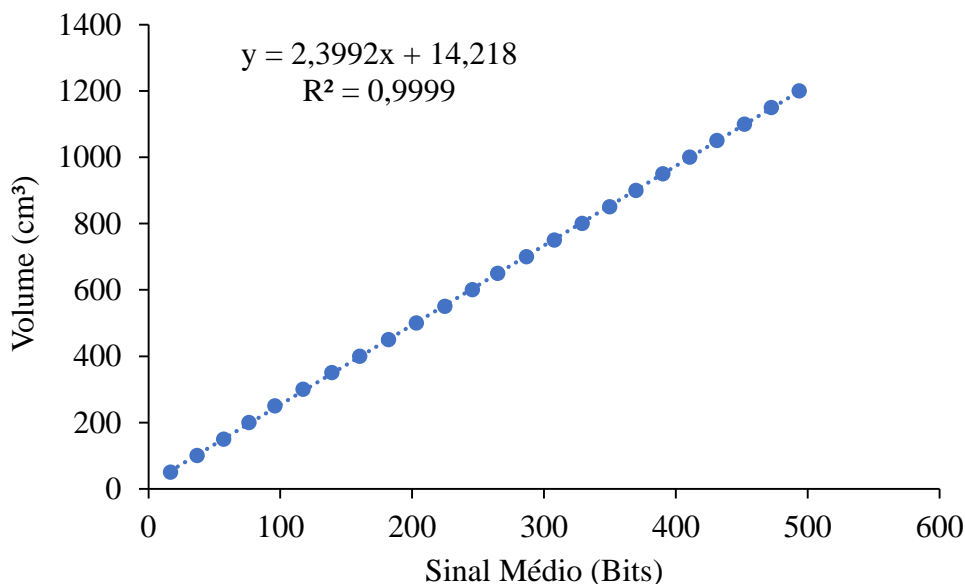


Figura 21. Curva de calibração do transdutor de pressão de uso industrial modelo PSI.420 A5 50MBAR 12N.

Devido ao fato que a resposta do transdutor apresentou alta linearidade e estabilidade, conforme demonstra do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9999$), os resultados apresentados na média calculada foram praticamente idênticos aos volumes adicionados no coletor, indicando a exatidão nas medidas e a adequação da curva de calibração (Figura 22), com erro padrão de 0,081 cm³. Portanto, o transdutor PSI.420 apresentou características satisfatórias para o desenvolvimento do coletor de enxurrada. Cabe destacar que para escoamento inferior a 50 cm³ pode ocorrer uma superestimativa do volume, decorrente da posição do tubo de acoplamento do transdutor que foi posicionado a uma distância de aproximadamente 3 mm do fundo do coletor, visando a entrada da água. Ou seja, quando a lâmina de água é inferior a esse valor o transdutor não percebe o volume de água no coletor. Porém, para a finalidade de coleta de enxurrada esse fato não configura uma limitação pois o coletor opera a cada 200 cm³ de enxurrada coletados.

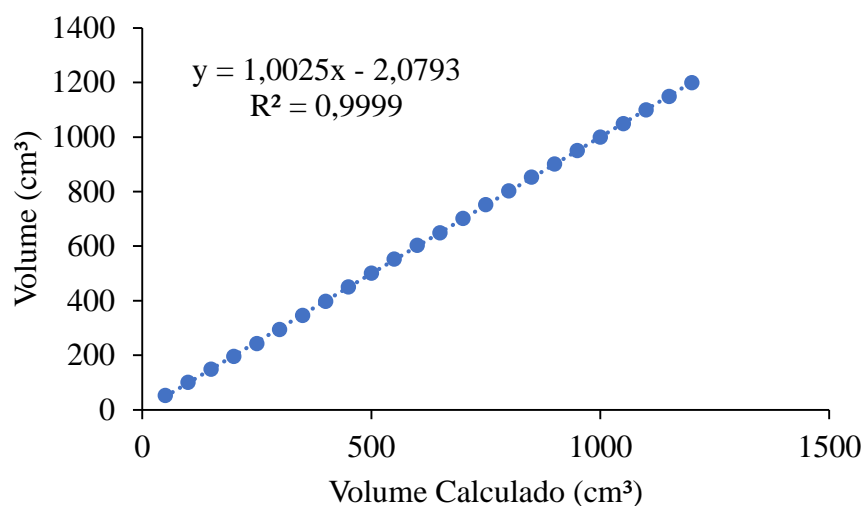


Figura 22. Volume mensurado em proveta graduada em relação ao volume calculado pela curva de calibração gerada para o sensor de pressão PSI.420 A5 50MBAR 12N.

A curva de calibração dos demais sensores é apresentada na Figura 23.

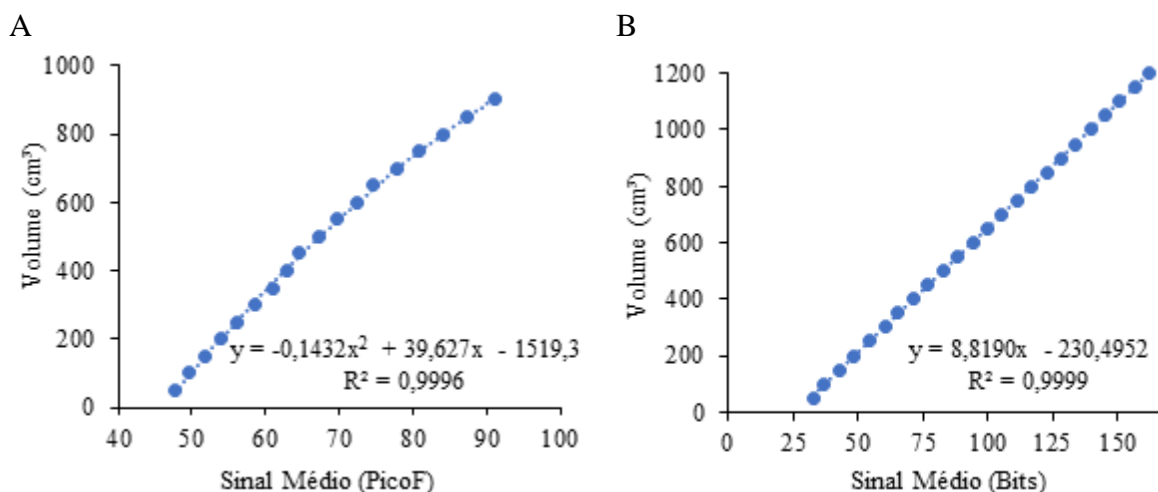


Figura 23. Curvas de calibração para o sensor capacitivo (A) e o sensor de pressão modelo MPX5010Dp (B).

O erro padrão médio para o sensor capacitivo e o MPX5010Dp foram de 3,058 e 2,237 cm^3 respectivamente. Apesar de ambos os sensores terem apresentado boas curvas de calibração e bons coeficientes de determinação, o modelo industrial PSI.420 se mostrou mais adequado ao desenvolvimento do coletor e foi selecionado para o desenvolvimento do protótipo. A opção de utilizar um transdutor de pressão é baseada em resultados positivos de seu emprego em trabalhos científicos que integram tais componentes para mensurar o nível da água, gás e outras substâncias (SCHENATO et al., 2019; SÁ et al., 2021; CHAN et al., 2021).

4.5.2 Calibração do sensor de turbidez

A calibração do sensor de turbidez utilizando amostras de solo peneiradas (SR) e amostras de enxurrada obtidas na mesma área experimental (CR) (Figura 24) proporcionaram resultados satisfatórios, com coeficientes de determinação para regressão linear superiores

99%. Como esperado, a metodologia de calibração altera os coeficientes das equações, sendo obtido coeficiente angular 27 vezes maior quando a calibração é realizada a partir do método CR. É importante ressaltar que os valores do sinal elétrico são inversamente proporcionais à concentração de sólidos em suspensão. Isso ocorre pelo fato das emissões de infravermelho serem captadas em menor proporção à medida que a solução se torna mais turva, chegando menos luz ao fotodetector, que converte a luminosidade em sinal elétrico (Merten et al., 2014).

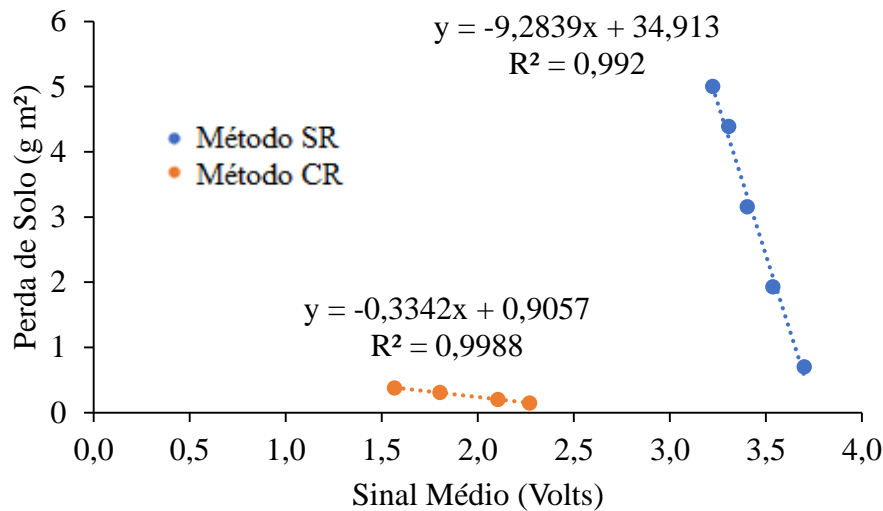


Figura 24. Curvas de calibração para o turbidímetro geradas a partir das médias das amostras peneiradas e preparadas em laboratório e obtidas a partir das metodologias SR e CR.

Na Tabela 8 são apresentados os dados médios gerados a partir da calibração SR. Para as concentrações utilizadas nessa metodologia de calibração que simula a enxurrada os resultados de desvio padrão, percentual de variação e incertezas foram baixos, indicando que o sensor é capaz de aferir leituras com boa precisão nas condições ao qual foi submetido.

Tabela 8. Valores estatísticos do sinal de resposta do turbidímetro a partir dos dados (média de 15 repetições) calibrado pelo método SR.

Perda de solo (g m ⁻²)	Sinal médio (V)	Desvio padrão (g m ⁻²)	CV%	Incerteza tipo A (g m ⁻²)
0,000	3,785	0,021	0,546	0,005
0,700	3,699	0,044	1,194	0,011
1,928	3,536	0,024	0,666	0,006
3,157	3,403	0,037	1,098	0,010
4,386	3,307	0,024	0,727	0,006
5000	3,223	0,023	0,698	0,006
Média		0,029	0,821	0,007

As médias do sinal do turbidímetro e respectivos desvios padrões, coeficiente de variação e a incerteza tipo A para a calibração pelo método CR são apresentados a seguir na Tabela 9. Os resultados pelos indicadores estatísticos a partir da enxurrada coletada com o simulador de chuva apresentam baixos valores médios, assim como na calibração anterior,

sugerindo que o sensor é capaz de gerar uma boa repetibilidade de resposta para pequenas quantidades do solo em suspensão em água, o que sugere que por esse método é possível se obter uma boa calibração para o sensor ST100.

Tabela 9. Valores estatísticos do sinal de resposta do turbidímetro (média de 30 repetições) calibrado a partir do método CR.

Perda de solo (g m ⁻²)	Sinal médio (V)	Desvio padrão (g m ⁻²)	CV%	Incerteza tipo A (g m ⁻²)
0,145	2,270	0,202	8,908	0.037
0,202	2,105	0,029	1,394	0.005
0,308	1,803	0,051	2,832	0.009
0,379	1,567	0,074	4,711	0.013
Média		0,089	4,461	0,016

O fato que de metodologia CR ter apresentado valores de CV% e incertezas maiores em relação à metodologia SR pode estar relacionado com à falta de homogeneização das partículas na solução da enxurrada coletada se comparada à solução produzida em laboratório após peneiramento. Mesmo assim, ambas as metodologias apresentaram resultados promissores com o sensor avaliado.

Estudos indicam que existe alta correlação entre a turbidez e valores de concentração de sedimentos em suspensão, geralmente utilizados para aferir o efeito da erosão em ambientes fluviais (MERTEN et al., 2014; FERRAZ et al., 2018; BAUCKE et al., 2020). Em nosso estudo, os dados de perda de solo obtidos em laboratório se correlacionaram em - 95,91% com os valores de sinal obtidos pelo sensor de turbidez. Dessa forma podemos considerar que o sensor de turbidez ST100 pode ser considerado uma opção viável para o desenvolvimento do coletor automático de enxurrada integrando a equação gerada a partir do método de calibração CR à programação no Arduino. Para outras classes de solo, o método CR deve ser utilizado considerando que turbidímetros apresentam dependências quanto ao tamanho, forma e cor das partículas (LANDERS & STURM, 2013; MERTEN et al., 2014; XU et al., 2020; ZHAN et al., 2021).

4.5.3 Avaliação do equipamento em campo

O ensaio em campo com o protótipo demonstrou que o equipamento atendeu as expectativas iniciais em armazenar informações do momento da coleta, volume e perda de solo da enxurrada produzida pelo *InfAsper*. A imagem da instalação do equipamento e detalhamento da parcela experimental de 0,70 m² são apresentados na Figura 25.

A metodologia de calibração do volume aplicada ao PSI.420 se mostrou adequada, assim como a perda de solo obtida a partir da calibração do ST100 com os dados de campo possibilitou resultados mais próximos aos obtidos pelo método gravimétrico com aferições em laboratório (Figura 26). O erro médio observado quando a perda de solo foi estimada a partir da curva de calibração gerada pelo método SR foi de aproximadamente 46 vezes maior em relação às perdas de solo aferidas pelo método gravimétrico e pelo método CR. Com a metodologia que utilizou amostras obtidas previamente em campo, o erro médio observado foi de 13,16%. Zahn et al. (2021) encontraram erros semelhantes (13,67%) em medições instrumentadas para concentrações de 2 g L⁻¹.

A



B



Figura 25. Estrutura da parcela coletora (A) e foto da instalação do coletor em campo junto ao simulador *InfiAsper* (B).

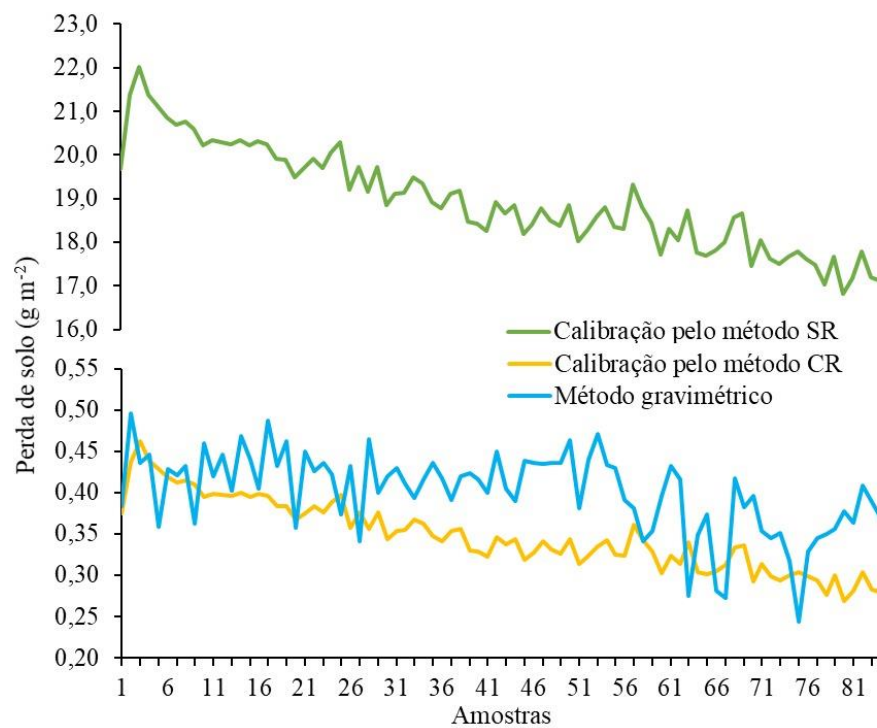


Figura 26. Dados de perda de solo obtidos pela metodologia SR e CR a partir da calibração com material peneirado e por coleta de campo.

A superestimativa gerada na metodologia SR sugere que a forma com que a solução que representa a enxurrada foi preparada destoava muito das condições de campo. Esse fato pode estar atrelado à questão de como as partículas dispersas pelo impacto das gotas de chuva simulada se distribuem em diferentes granulometrias suspensas na solução carregada. Como essas características apresentam alto grau de complexidade em se reproduzir em laboratório (Deletic, 2005) calibrar o sensor de turbidez baseado no método SR não é uma opção viável, até que seja possível o preparo dessas amostras de forma fidedigna ao que é reproduzido pelo simulador em campo. Sendo assim, recomenda-se que a calibração do sensor de turbidez seja efetuada com base no método CR.

A Figura 27 apresenta os resultados obtidos em ensaio completo em campo utilizando o protótipo coletor em conjunto com o *InfiAsper*. Os desvios padrões médios obtidos automaticamente pelo coletor (23,18 g m⁻²) e pela averiguação em laboratório (20,65 g m⁻²) foram similares, indicando que o protótipo é funcional e atende ao objetivo de agilizar a obtenção de dados de perda de solo a partir de chuvas simuladas. Com relação ao volume de enxurrada, o erro médio observado foi de 12,25%, considerado aceitável em virtude das dificuldades de mensuração desse tipo de dados em campo.

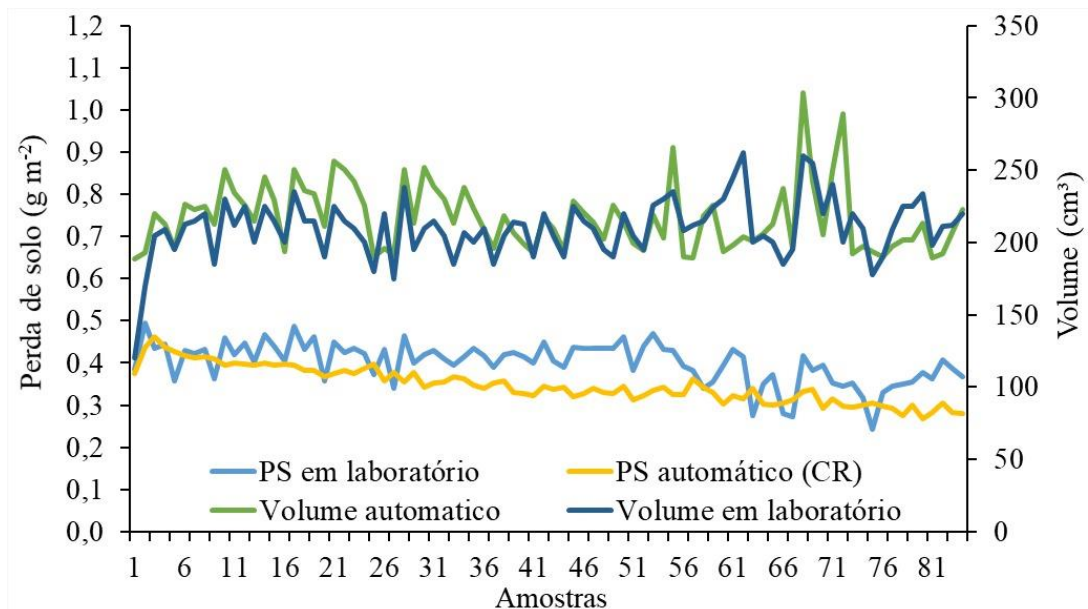


Figura 27. Perda de solo (PS) e volume de enxurrada coletados automaticamente e manualmente aferido em laboratório.

De um modo geral, os sensores selecionados para confecção desse protótipo apresentaram um bom desempenho para mensurar o volume de enxurrada e a perda de solo para a área onde foram conduzidos os testes e considerando as metodologias de calibração aplicadas.

4.5.4 Análise de custos e viabilidade técnica

O levantamento dos custos dos materiais utilizados no desenvolvimento do protótipo é apresentado na Tabela 10. O sensor de pressão PSI.420 foi o que apresentou a melhor calibração e desempenho para computar o volume de enxurrada. Entretanto, seu custo de aquisição é superior aos demais.

Tabela 10. Custos dos principais componentes usados e sensores testados para o desenvolvimento do coletor de enxurrada (preços datados de 30/06/2021).

Dispositivo	Modelo	Preço
Pressão	PSI.420 A5 50MBAR 12N	\$ 431,64
Pressão	MPX5010Dp	\$ 28,42
Capacitivo	Não comercial*	\$ 3,50
Turbidez	ST100	\$ 57,46
Microcontrolador	Arduino Mega® 2560	\$ 28,89
Módulo Micro SD	REF: 4MD36	\$ 1,93
Cartão Micro SD	ScanDisc Ultra 16 Gb	\$ 9,74
Válvula Solenoide	12V NF Ação Direta**	\$ 58,59
Módulo Rele	JQC-3FF-S -Z**	\$ 3,30
Display LCD	SKU: 500	\$ 4,30
Estrutura de PVC	200 e 100 mm + Caps usados *	\$ 68,62
Fontes	Bivolt 12V 2A + 12V 3,5A	\$ 14,44
Painel	Case 100x150x214 mm	\$ 13,44

*Preço especificado a partir do custo do material para produção do sensor; ** Preço para duas unidades que foram utilizadas; Obs.: Preço convertido para Dólar na cotação de 16/03/2022.

Baseado nos custos dos sensores selecionados para a confecção do coletor e os demais componentes utilizados o valor total aproximado do protótipo ficou em \$ 692,56. Mesmo sendo um equipamento de baixo custo, uma versão mais barata e com eficiência semelhante pode ser confeccionada a partir da substituição dos componentes por versões de menor custo, sobretudo substituindo o sensor PSI.420 pelo MPX5010Dp, o que reduziria o custo total em 58,2%. Entretanto, isso implicaria na redução da precisão e acurácia dos dados obtidos pelo equipamento. Ao utilizarem o MPX5010Dp no desenvolvimento de um sistema coletor para aspersores em laboratório, Queiroz et al. (2008) consideraram o uso do sensor como viável economicamente para seu uso em leituras automáticas de volumes de água.

O protótipo desenvolvido cumpre satisfatoriamente a função de obtenção de informações de enxurradas oriundas de simuladores de chuva portáteis, sendo uma ferramenta útil para obtenção de dados em menos tempo e reduzindo a possibilidade de erro humano. Uma das principais vantagens do coletor está na possibilidade de gerar maior número de informações em um único teste, podendo ser utilizado para analisar toda a enxurrada produzida ao longo de uma simulação e sem a necessidade de armazenar grande quantidade de amostras, pois podem ser descartadas logo após os dados terem sido realizados. Essa metodologia, portanto, facilita o uso extensivo de simuladores de chuvas em estudos de grande proporção e reduz gastos e minimiza os procedimentos para análise das amostras coletadas em áreas extensas, como o que ocorre em estudos de bacias hidrográficas (SANTOS et al., 2018; ALMEIDA et al., 2018; ASSIS et al., 2021).

Algumas ressalvas quanto as limitações desse protótipo em campo também devem ser destacadas, como a necessidade de posicionamento do coletor pelo menos 40 cm abaixo do nível da calha coletora do simulador de chuvas e o seu perfeito nivelamento para garantir o funcionamento adequado. Além disto, o acúmulo de partículas de solo no interior da estrutura pode proporcionar erros grosseiros na determinação das perdas de solo, sendo necessária avaliação das respostas do equipamento pós calibração.

O equipamento permitiu a rápida obtenção dos dados de perda de solo e volume em campo. O tempo para análise e processamento dos dados pelo método laboratorial foi de 4 dias aproximadamente, enquanto o processamento dos dados obtidos automaticamente levou

apenas algumas horas. Além disso, para a coleta manual foram necessários o transporte e o armazenamento de um grande número de garrafas de 500 cm³, o que representa investimentos monetários e logísticos.

A partir de todas as informações geradas no desenvolvimento deste protótipo, um novo equipamento mais eficiente tem sido preconizado, integrando uma arquitetura que facilite sua instalação em campo, a portabilidade e a comunicação com o usuário (KUMAR et al., 2021; ZHAN et al. 2021). Além disso, a metodologia de calibração do turbidímetro para atuar em diferentes tipos de solo pode ser aprimorada (XU et al., 2020) e também adicionada novas funcionalidades que facilite ainda mais a obtenção dos dados gerados pelo simulador de chuva e reduza custos e demais limitações observadas.

A partir de todas as informações geradas no desenvolvimento deste protótipo observamos um bom potencial do coletor para gerar um produto possível de ser industrializado e com a possibilidade de futuras atualizações integrando uma arquitetura que facilite sua instalação em campo, portabilidade e a comunicação com o usuário (KUMAR et al., 2021; ZHAN et al. 2021). Além disso, a metodologia de calibração do turbidímetro para atuar em diferentes tipos de solo pode ser explorada (XU et al., 2020).

4.6 CONCLUSÕES

Neste estudo, desenvolvemos um coletor de enxurrada capaz de quantificar em tempo real o escoamento e a perda de solo com base em um sistema de medição de volume da enxurrada (sensores de pressão ou capacitivos) e perda de solo (sensor de turbidez). Nosso coletor proposto foi eficaz na determinação do volume de escoamento e perda de solo durante um teste simulado de chuva em campo, gerando erros médios de 12,25% e 13,16% para volume de água e perda de solo, respectivamente.

O coletor de enxurrada automático equipado com o transdutor de pressão PSI.420 e o sensor de turbidez ST100 tem o potencial de obter e armazenar instantaneamente dados de escoamento. O protótipo testado e avaliado possui baixo custo de fabricação e contribui de forma relevante para futuras aplicações em estudos com simuladores de chuva, agilizando e facilitando a obtenção de dados de erosão em campo.

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKSOY, H.; UNAL, N. E.; COKGOR, S.; GEDIKLI, A.; YOON, J.; KOCA, K.; INCI, B.; ERIS, E. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. **Catena**, v.98, p.63-72, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.06.009>.
- ALMEIDA, W. S.; CARVALHO, D. F.; PEREIRA, F. A. C.; ROUWS, J. R. C. Sediment production and soil water infiltration under different simulated rainfall characteristics. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.8, p.572-578, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n8p572-578>.
- ALMEIDA, W. S.; PANACHUKI, E.; OLIVEIRA, P. T. S.; MENEZES, R. S.; ALVES SOBRINHO, T., CARVALHO, D. F. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil & Tillage Research**, v.175, p.130-138, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>.
- ALMEIDA, W. S.; SEITZ, S.; OLIVEIRA, L. F. C.; 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, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.10.004>.
- ALVES SOBRINHO, T.; GOMEZ-MACPHERSON, H., GÓMEZ, J. A. A portable integrated rainfall and overland flow Simulator. **Soil Use and Management**, v.24, n.2, p.163-170, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00150.x>.
- ANACHE, J. A. A.; BACCHI, C. G.; ALVES SOBRINHO, T. Modeling of (R) USLE C-factor for pasture as a function of Normalized Difference Vegetation Index. **European International Journal of Science and Technology**, v.3, n.9, 2014. 2304-9693.
- ASSIS, K. G. O.; SILVA, Y. J. A. B.; LOPES, J. W. B.; MEDEIROS, J. C.; TEIXEIRA, M. P. R.; RIMÁ, F. B.; SINGH, V. P.; Soil loss and sediment yield in a perennial catchment in southwest Piauí, Brazil. **Environ Monit Assess**, v.26, n.193, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08789-y>.
- BAUCKE, A. S.; FERRARI, J. C.; MICHEL, G. P.; GOETTEN, W. J. Descarga sólida do rio Itajaí do Sul mediante a aplicação do método simplificado de Colby. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 297-315, 2020. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e42020297-315>.
- CERDÀ, A.; ACKERMANN, O.; TEROL, E.; RODRIGO-COMINO, J. Impact of Farmland Abandonment on Water Resources and Soil Conservation in Citrus Plantations in Eastern Spain. **Water**, v.11, n.4, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11040824>.
- CHAN, K.; SCHILLEREFF, D. N.; BAAS, A. C. W.; CHADWICK, M. A.; MAIN, B.; MULLIGAN, M.; O'SHEA, F. T.; PEARCE, R.; SMITH, T. W. L.; SOESBERGEN, A. V.; TEBBS, E.; THOMPSON, J. Low-cost electronic sensors for environmental research: Pitfalls and opportunities. *Progress in Physical Geography*, v.45, p.1-34, 2020. <https://doi.org/10.1177/0309133320956567>.

DELETIC, A. Sediment transport in urban runoff over grassed areas. **Journal of Hydrology**, v.301, p.108-122, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.023>.

FERRAZ, L. L.; LIMA, F. A.; GUEDES, U. L.; SILVA, F. G. C.; ROCHA, F. A. Estimativa da descarga de sedimentos transportados na bacia hidrográfica do rio Verruga. **Agrarian Academy**, v.5, n.9, p.224-233, 2018. https://doi.org/10.18677/Agrarian_Academy_2018a23.

GIPPEL, C. J. The use of turbidimeters in suspended sediment research. **Hydrobiologia**, v.176, n.177, p.465-480, 1989. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00026582>.

GRANDO, D. L.; GATIBONI, L. C.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; SCHMITT, D. E.; MUMBACH, G. L.; SOUZA JUNIOR, A. A.; BRIGNOLI, F. M. Development and validation of a siphoning prototype for surface runoff evaluation. *Journal of Environmental Quality*, v.50, n.5, p.1246-1253, 2021. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20266>.

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.J., LÁZARO^J, R., LEÓN, F.J., MARTÍNEZ-MENA, M., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., MARZEN, M., WIRTZ, S., 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. **Catena**. v. 110, p. 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013>.

KUMAR, G.; SENA, D. R.; PATRA, S.; SINGH, D.; KUROTHE, R. S.; MISHRA, P. K.; NYONAND. Design and Development of a Low-Cost Automatic Runoff Sampler for Time Distributed Sampling. **Journal of Hydrology**, v.592, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125845>.

LANDERS, M. N.; STURM, T. W. Hysteresis in suspended sediment to turbidity relations due to changing particle size distributions. **Water Resources Research**, v. 49, n. 9, p. 5487-5500, 2013. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20394>.

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

MERTEN, G. H.; CAPEL, P. D.; MINELLA, J. P. G. Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors. **Journal Soils Sediments**, v.14, p.1235-1241, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0813-0>.

NIELSEN, K. T.; MOLDRUP, P.; THORND AHL, S.; NIELSEN, J. E.; DUUS, L. B.; RASMUSSEN, S. H.; UGGERBY, M.; RASMUSSEN, M. R. Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. **Hydrological Processes**, v.33, p.3364-3377, 2019. <https://doi.org/10.1002/hyp.13563>.

MUTTER, G. M. The Use of Portable Turbidity Meters in Developing an Erodibility Classification System for Iraqi Soils. **International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology**, v.4, n.1, p.1107-1117, 2018.

PANACHUKI, E.; SANTOS, M. A. N.; PAVEL, 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. 0, p. 926-932, 2015. <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.8908>.

QUEIROZ, T. M.; LIMA, S. C. R. V.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. Coletor automático para ensaio de aspersores em laboratório (1) – desenvolvimento do modelo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.2, n.1, p.24–28, 2008. <https://doi.org/10.7127/rbai.v2n100200>.

SÁ, A. B.; PIGOZZO FILHO, V. C.; TADRIST, L. PASSOS, J. C. Experimental study of a linear Fresnel concentrator: A new procedure for optical and heat losses characterization. **Energy**, v.232, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121019>.

SALEM H. M.; MESELHY, A. A. A portable rainfall simulator to evaluate the factors affecting soil erosion in the northwestern coastal zone of Egypt. **Natural Hazards**, v. 105, p. 2937–2955, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04432-8>.

SANTOS, C. A.; FRIGO, E. P.; FRIGO, K. D. A.; ECKERT, C. T.; DIETER, J.; ALVES, H. J.; TOKURA, L. K.; SANTOS, R. F. Impact of pervious pavement in urban areas on catchment basin recovery. **Ciências Agrárias**, v.39, n.1, p.39-49, 2018. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n1p39>.

SCHENATO, L.; LÓPEZ, J. P. A.; GALTAROSSA, A.; PASUTO, A.; BOGAARD, T.; PALMIERI, L. Design and field testing of a fiber optic pressure sensor for underground water level monitoring. **European Workshop on Optical Fiber Sensors**, v.111990J, 2019. <https://doi.org/10.1117/12.2540812>.

SEITZ, S.; GOEBES, P.; PUERTA, V. L.; PEREIRA, E. I. P.; WITTWER, R.; SIX, J.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; SCHOLTEN, T. Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. **Agronomy for Sustainable Development**, v.39, n.4, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0545-z>.

XU, X.; FAN, H.; CHEN, X.; MI, C. Estimating low eroded sediment concentrations by turbidity and spectral characteristics based on a laboratory experiment. **Environmental monitoring and assessment**, v. 192, n. 2, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8092-x>.

ZHAN, X.; ZHAO, J.; ZHU-BARKER, X.; SHUI, J.; LIU, B.; GUO, M.; An instrument with constant volume approach for in situ measurement of surface runoff and suspended sediment concentration. **Water Resources Research**, v. 57, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020WR028210>.

5. CONCLUSÃO GERAL

Mediante as informações apresentadas neste documento de tese aceitamos as hipóteses apresentadas neste trabalho, de que a instalação de componentes eletrônicos no painel de controle do *InfiAsper* possibilita uma variação e prévia programação da IP ao longo de uma simulação, e que o desenvolvimento de um coletor automático de enxurrada facilita a obtenção dos dados em campo sob chuva simulada.

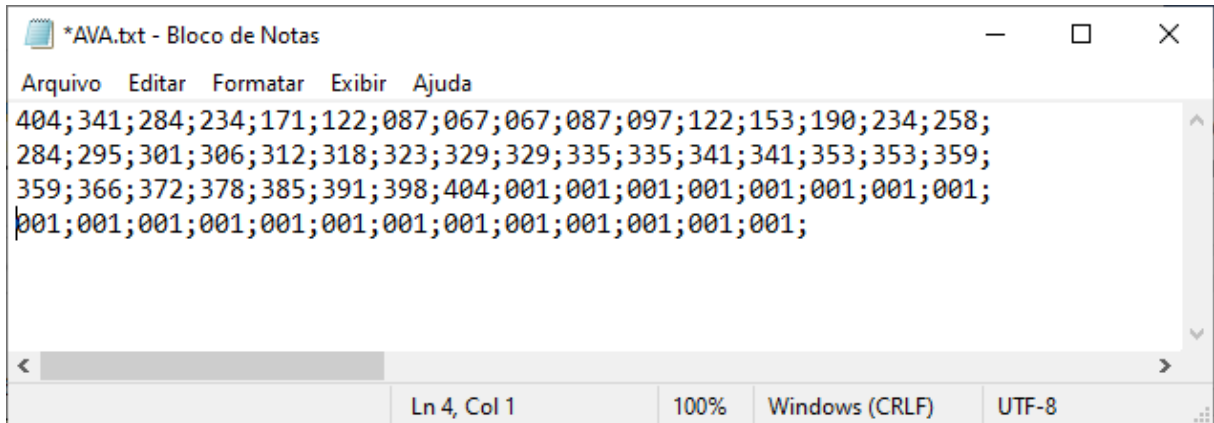
O painel desenvolvido possibilitou a simulação de chuvas com padrões personalizados, com picos de intensidade de precipitação de 110 mm h^{-1} e duração de 40 min, e uniformidade acima de 75%. Essa inovação no sistema do *InfiAsper* permite a personalização da chuva por minuto, possibilitando o desenvolvimento de pesquisas de campo mais complexas com maior grau de realismo.

A utilização do novo painel em testes de campo apresentou resultados satisfatórios e informações condizentes com as características esperadas dos padrões naturais de chuva. Para as condições avaliadas, os padrões de chuvas intermediário e atrasado produziram maiores perdas de solo e água do que o padrão avançado. Os padrões de chuva intermediário invertido e constante não produziram perdas significativas para a aplicação da lâmina média de 30 mm.

O coletor automático de enxurrada equipado com o transdutor de pressão PSI.420 e o sensor de turbidez ST100 apresenta potencial para a obtenção e armazenamento de dados de enxurrada de forma instantânea sendo eficaz na determinação no volume e perda de solo proveniente da enxurrada produzida pelo *InfiAsper*.

6. ANEXOS

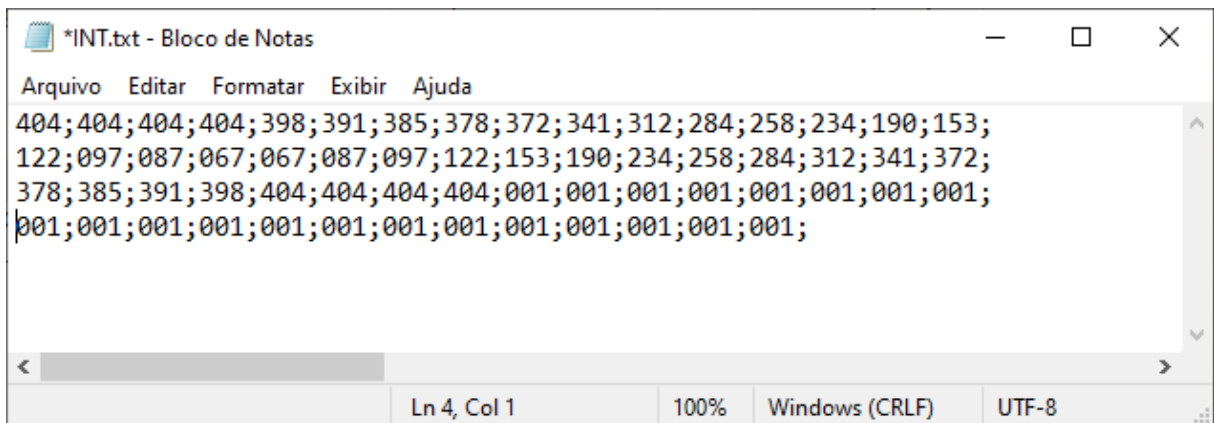
6.1 Anexo A



```
*AVA.txt - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
404;341;284;234;171;122;087;067;067;087;097;122;153;190;234;258;
284;295;301;306;312;318;323;329;329;335;335;341;341;353;353;359;
359;366;372;378;385;391;398;404;001;001;001;001;001;001;001;001;
001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;
Ln 4, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8
```

Figura 28. Formato do arquivo de programação do padrão Avançado (arquivo AVA.txt). Valores “001” representam o código para finalização da simulação.

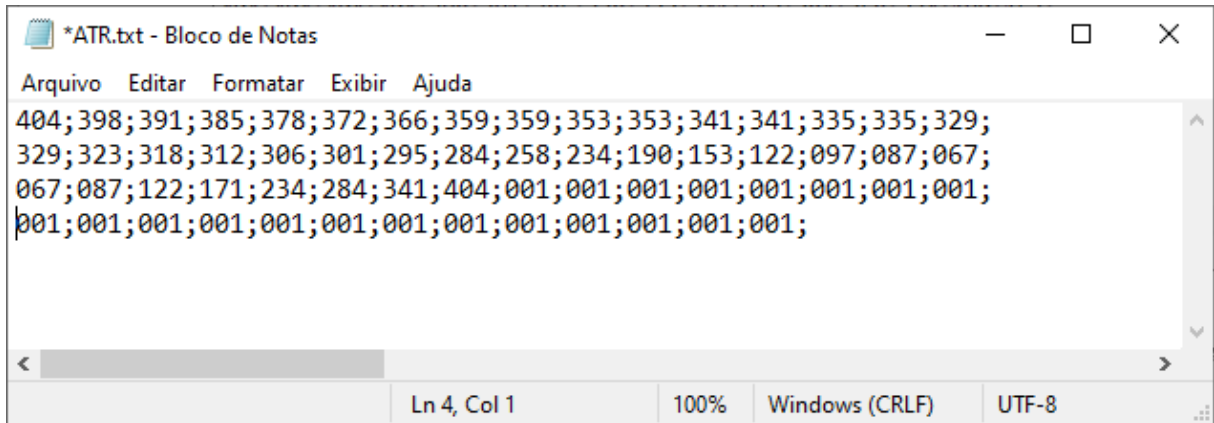
6.2 Anexo B



```
*INT.txt - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
404;404;404;404;398;391;385;378;372;341;312;284;258;234;190;153;
122;097;087;067;067;087;097;122;153;190;234;258;284;312;341;372;
378;385;391;398;404;404;404;404;001;001;001;001;001;001;001;001;
001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;
Ln 4, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8
```

Figura 29. Formato do arquivo de programação do padrão Intermediário (arquivo INT.txt). Valores “001” representam o código para finalização da simulação.

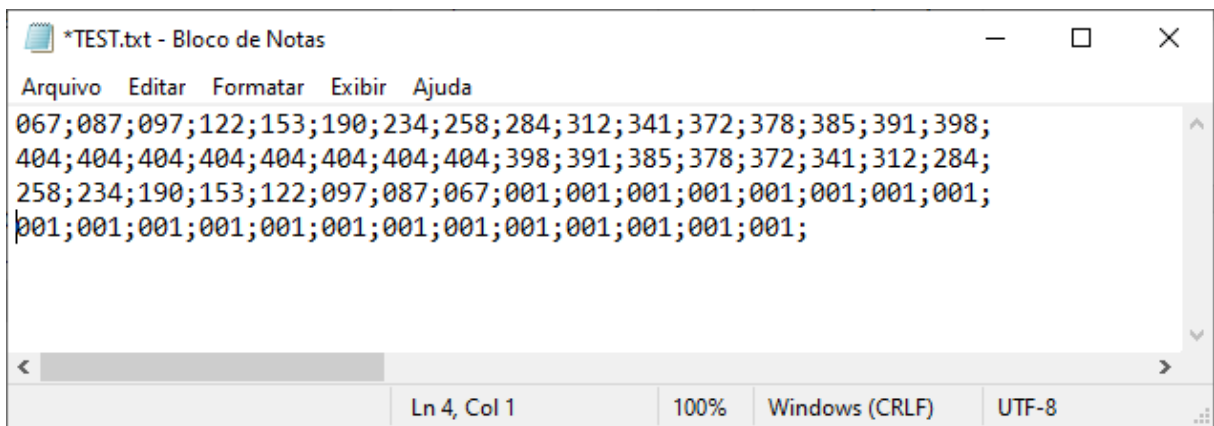
6.3 Anexo C



```
*ATR.txt - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
404;398;391;385;378;372;366;359;353;353;341;341;335;335;329;
329;323;318;312;306;301;295;284;258;234;190;153;122;097;087;067;
067;087;122;171;234;284;341;404;001;001;001;001;001;001;001;001;
001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;
```

Figura 30. Formato do arquivo de programação do padrão Atrasado (arquivo ATR.txt). Valores “001” representam o código para finalização da simulação.

6.4 Anexo D



```
*TEST.txt - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
067;087;097;122;153;190;234;258;284;312;341;372;378;385;391;398;
404;404;404;404;404;404;404;404;398;391;385;378;372;341;312;284;
258;234;190;153;122;097;087;067;001;001;001;001;001;001;001;001;
001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;001;
```

Figura 31. Formato do arquivo de programação do padrão personalizado aonde foi inserido o padrão intermediário invertido (arquivo TEST.txt). Valores “001” representam o código para finalização da simulação.