

MAYRA BEATRIZ SEMIANO CASTRO

**PERDAS DE ÁGUA E SOLO POR EROSÃO EM SIMULADOR
DE CHUVAS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO SUBMETIDO A NÍVEIS
DE COMPACTAÇÃO**

CASCATEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2024

MAYRA BEATRIZ SEMIANO CASTRO

**PERDAS DE ÁGUA E SOLO POR EROÇÃO EM SIMULADOR DE CHUVAS DE
UM LATOSSOLO ARGILOSO SUBMETIDO A NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO**

Dissertação apresentada à
Universidade Estadual do Oeste do
Paraná, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Energia na Agricultura
para obtenção do título de Mestre

Orientador: Dr. Deonir Secco

Coorientadores:

Dra. Araceli Ciotti de Marins

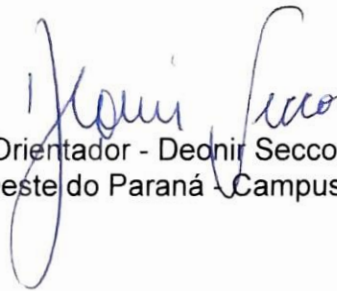
Dr. Douglas Bassegio

CASCVEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2024

MAYRA BEATRIZ SEMIANO CASTRO

Perdas de água e solo por erosão em simulador de chuvas de um latossolo argiloso submetido a níveis de compactação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biomassa e culturas energéticas, APROVADA pela seguinte banca examinadora:



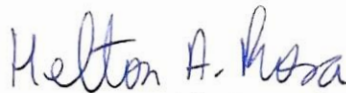
Orientador - Dednir Secco

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Flávio Gurgacz

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Héilton Aparecido Rosa

Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (FAG)

Cascavel, 16 de fevereiro de 2024

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Semiano Castro, Mayra Beatriz

Perdas de água e solo por erosão em simulador de chuvas de um Latossolo argiloso submetido a níveis de compactação / Mayra Beatriz Semiano Castro; orientador Deonir Secco; coorientadora Araceli Ciotti de Marins. -- Cascavel, 2024. 59 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, 2024.

1. Simulador de chuva. 2. Erosão. 3. Compactação. 4. Plantio direto. I. Secco, Deonir, orient. II. Marins, Araceli Ciotti de , coorient. III. Título.

“In the end we will conserve only what we love; we will love only what we understand; and we will understand only what we have been taught” (Baba Dioum, 1968).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por se fazer presente em todos os momentos da minha vida e pelas oportunidades colocadas no meu caminho;

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, e à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, pela oportunidade e formação;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos;

Ao Prof.^o Dr. ^o Deonir Secco, pela orientação, oportunidade, ensinamentos e conselhos que foram fundamentais para realização desta pesquisa;

À minha família, meus pais Francisco e Katia, por todo amor, paciência, por estarem sempre ao meu lado apoiando e incentivando principalmente nos momentos mais difíceis, a minha irmã Lara pelo carinho e meu companheiro Matheus por acreditar no meu potencial mais que eu;

À minha amiga Ellen Lemes por toda ajuda, incentivo, companhia e amizade;

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura pelos ensinamentos transmitidos;

À todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Classificação de erodibilidade (K)..... | 8 |
| Tabela 2. Características técnicas do bico aspersor..... | 13 |
| Tabela 3. Composição granulométrica do solo nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m da área experimental do IDR/Santa Tereza | 16 |
| Tabela 4. Análise de variância da perda de solo (PS), perda de água (PA) e coeficiente de escoamento (C) de acordo com a densidade do solo e a declividade | 22 |
| Tabela 5. Interação da densidade do solo e a declividade da rampa para perda de solo, perda de água e coeficiente de escoamento | 23 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Curva de retenção de água no solo (A); Curvas de retenção de água no solo afetadas por densidades diferentes (B). Fonte: DEXTER (2004)..... | 6 |
| Figura 2. Simulador de chuva. Fonte: Vidaletti (2022)..... | 11 |
| Figura 3. Blocos de madeira para instalação das declividades. | 12 |
| Figura 4. Precipitação diária acumulada 2017/2018 (Chang, 2022)..... | 13 |
| Figura 5. Dispositivo com gradil de acoplamento no simulador de chuva para estabelecimento dos níveis de compactação do solo | 14 |
| Figura 6. Gradil de madeira com quadrantes preenchidos com solo na densidade desejada..... | 15 |
| Figura 7. Transporte do gradil de madeira com auxílio do guincho. | 16 |
| Figura 8. Cultivo de Triticale no IDR Paraná – Santa tereza. | 17 |
| Figura 9. Determinação da umidade da palhada em estufa com circulação forçada | 18 |
| Figura 10. Disposição da palha sobre o solo antes da simulação das perdas de água e solo por erosão..... | 19 |
| Figura 11. Escarificação superficial do solo após coleta das amostras com rastell manual de jardinagem. | 20 |
| Figura 12. Análise de regressão da macroporosidade (A), microporosidade (B) e porosidade total (C) em função dos valores de densidade do solo da camada de 0,1-0,2 m. | 25 |

| | |
|---|----|
| Figura 13. Superfície de resposta dos valores de perda de solo (PS) em função dos valores de densidade do solo (Ds) e declividade da rampa (Dec), equações de predição e coeficiente de determinação (R ²), nas três durações de chuva: 10, 20 e 30 minutos. | 27 |
| Figura 14. Superfície de resposta dos valores de perda de água (PA) em função dos valores de densidade do solo (Ds) e declividade da rampa (Dec), equações de predição e coeficiente de determinação (R ²), nas três durações de chuva: 10, 20 e 30 minutos. | 28 |
| Figura 15. Superfície de resposta dos valores de coeficiente de escoamento (C) em função dos valores de densidade do solo (Ds) e declividade da rampa (Dec), equações de predição e coeficiente de determinação (R ²), nas três durações de chuva: 10, 20 e 30 minutos. | 29 |
| Figura 16. Regressão da perda de solo em função da densidade do solo nas declividades de 6, 9, 12 e 18%..... | 30 |
| Figura 17. Regressão da perda de água em função da densidade do solo nas declividades de 6, 9, 12 e 18%..... | 32 |
| Figura 18. Regressão do coeficiente de escoamento em função da densidade do solo nas declividades de 6, 9, 12 e 18%..... | 33 |

CASTRO, Mayra Beatriz Semiano. Ma. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro, 2024. **Perdas de água e solo por erosão em simulador de chuvas de um Latossolo argiloso submetido a níveis de compactação.** Dr^o Deonir Secco; Dr^a Araceli Ciotti de Marins e Dr^o Douglas Bassegio.

RESUMO

A qualidade física do solo é afetada pelo uso e manejo do solo. Com a crescente adoção de máquinas agrícolas pesadas, problemas de degradação dos solos como compactação e erosão hídrica têm se intensificado. Desse modo, o objetivo do trabalho foi avaliar a influência de níveis de compactação de um Latossolo argiloso, declividades e duração da chuva, nas perdas de água e solo por erosão e no coeficiente de escoamento em simulador de chuva. O trabalho foi realizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, junto ao laboratório de física do solo. O simulador de chuva possui uma caixa móvel com dimensões de 1,0 x 1,0 x 0,30 m. A intensidade de chuva foi fixada em 34 mm.h⁻¹ com tempos de duração de 10, 20 e 30 min. Foram utilizados quatro níveis de compactação com densidades de solo de: 1,1; 1,2; 1,3 e 1,4 Mg.m⁻³ e quatro níveis de declividade da rampa: 6, 9 12 e 18%. A compactação do solo foi realizada artificialmente na camada de 0,10-0,20 m, para simular às condições de campo, em que geralmente é esta a camada que apresenta restrição física em virtude de concentrar as tensões impostas pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas. Foram monitoradas as taxas de perdas de água e solo, coletando na calha do simulador o volume escoado da enxurrada e quantificada as perdas de solo e água. O delineamento experimental se configurou como inteiramente ao acaso, em arranjo fatorial, com quatro repetições para cada condição avaliada (nível de compactação x declividade de rampa). As perdas de água e solo por erosão, bem como o coeficiente de escoamento foram afetadas mais intensamente pela densidade do solo em relação à declividade da rampa à medida que aumentou o tempo de duração da chuva, evidenciando que quando o solo está com alto nível de compactação a declividade da rampa é menos determinante nas perdas de água solo por erosão. Entretanto, nos baixos valores de densidade do solo (até 1,2 Mg.m⁻³), as perdas de água e solo foram mais influenciadas pela declividade da rampa.

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

Palavras-chave: Degradação física do solo; estrutura do solo; escoamento superficial.

CASTRO, Mayra Beatriz Semiano. Ma. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, February, 2024. **Water and soil losses by erosion in a rainfall simulator of compaction states of a clayey oxisol.** Dr^o Deonir Secco; Dr^a Araceli Ciotti de Marins e Dr^o Douglas Bassegio.

ABSTRACT

Soil physical quality is affected by soil use and management. With the increasing adoption of heavy agricultural machinery, soil degradation problems such as compaction and water erosion have been intensified. Thus, the objective of this work was to evaluate the influence of compaction levels of a clayey Oxisol, slopes and rainfall duration, on water and soil losses by erosion and on the runoff coefficient in a rain simulator. This study was carried out at the Universidade Estadual do Oeste do Paraná, next to the soil physics laboratory. The rain simulator has a mobile box with dimensions of 1.0 x 1.0 x 0.30 m. Rainfall intensity was fixed at 34 mm.h⁻¹ with duration times of 10, 20 and 30 min. Four compaction levels were used with soil densities of: 1.1; 1.2; 1.3 and 1.4 Mg.m⁻³ and four slope levels of the ramp: 6, 9, 12 and 18%. Soil compaction was performed artificially in the 0.10-0.20 m layer, to simulate field conditions, in which this is usually the layer that presents physical restrictions due to concentrating the stresses imposed by the traffic of machines and implements agricultural. The rates of water and soil losses were monitored, collecting the runoff volume in the simulator's gutter and quantifying soil and water losses. The experimental design was completely randomized, in a factorial arrangement, with four replications for each evaluated condition (compaction level x ramp slope). Losses of water and soil by erosion, as well as the runoff coefficient, were more intensely affected by soil density in relation to the ramp slope as the duration of the rain increased, showing that when the soil has a high level of compaction the ramp slope is less determinant in soil water losses by erosion. However, at low soil density values (up to 1.2 Mg.m⁻³), water and soil losses were more influenced by the ramp slope.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001"

Keywords: Soil physical degradation; soil structure; surface runoff.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| Objetivo Geral..... | 2 |
| Objetivo Específico..... | 2 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1 Degradação física do solo | 3 |
| 2.2 Compactação | 4 |
| 2.3 Agentes ativos na erosão | 6 |
| 2.4 Plantio direto..... | 9 |
| 2.5 Tráfego controlado de máquinas | 10 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 11 |
| 3.1 Localização e descrição do simulador | 11 |
| 3.2 Níveis de compactação | 13 |
| 3.3 Determinação das propriedades físicas do solo | 16 |
| 3.4 Cobertura do solo | 17 |
| 3.5 Coletas de água e solo | 18 |
| 3.6 Caracterização dos tratamentos..... | 20 |
| 3.7 Análises de regressão múltipla e estatísticas | 20 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 22 |
| 4.1 Interação dos fatores..... | 22 |
| 4.2 Análises de Regressão Múltipla | 26 |
| 4.3 Análises de regressão simples | 30 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 35 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 36 |

1. INTRODUÇÃO

A qualidade do solo é um conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas, que em equilíbrio, fornecerão à planta: água, nutrientes, temperatura, oxigênio e suporte, necessários para o seu desenvolvimento. Porém a retirada da vegetação natural, o uso intensivo e inadequado dos solos, favorecem sua degradação, podendo resultar em baixa aptidão agrícola com elevado potencial de deterioração (MONTEIRO, 2016), com problemas recorrentes de erosão, compactação, deterioração física, química e biológica do solo.

A adoção do sistema plantio direto (SPD) em substituição ao plantio convencional, como forma de conservação e redução da erosão, tem como principal característica o acúmulo dos restos culturais na superfície do solo sem mobilização do solo. Assim, diante da crescente demanda de máquinas e equipamentos maiores e robustos, a carga sobre o solo se intensifica. Essa carga sobre o solo em condições impróprias afeta as propriedades físicas e causa compactação do solo (STRECK et al., 2004; GUBIANI et al., 2015).

A compactação pode ser descrita como redução da porosidade, aumento na densidade e resistência à penetração de raízes, restringindo a absorção de nutrientes na planta causada pelo déficit na infiltração de água e trocas gasosas (MANTOVANI, 1987; DEXTER, 2004). Além disto, Latossolos com altos teores de argila se mostram mais susceptíveis à compactação devido ao tamanho e formato das partículas que resultam em alta coesão (COLLARES et al., 2008).

A redução da infiltração de água no solo afeta a retenção e detenção de água no solo, o que pode gerar maior escoamento superficial, que aliado ao potencial desagregador da gota de chuva e manejo inadequado da cobertura do solo resulta em erosão. A erosão hídrica se caracteriza em três etapas: desagregação, transporte e deposição. A primeira etapa, a desagregação, é o momento mais decisivo para este processo, pois o impacto da gota de chuva causará a desagregação das partículas superficiais do solo desprotegido.

As perdas de água e solo advinda da erosão hídrica, causam impactos negativos na produtividade das culturas, pois o carregamento das partículas reduz a fertilidade do solo, levando os nutrientes necessários ao desenvolvimento de culturas. Apesar da difícil quantificação de perdas de água em grandes áreas, o déficit na

infiltração diminui as reservas de água no solo, que são mais evidentes em períodos de estiagem, pois o aumento da densidade reduz a condutividade hidráulica e fluxo de água no solo (OLIVEIRA et al., 2013; GODOI et al., 2021). Portanto, investir em boas práticas de manejo e conservação de palhada sobre o solo, podem reduzir os eventuais efeitos da erosividade da chuva, como o carreamento de partículas e nutrientes.

A fim de quantificar o efeito da compactação em áreas agrícolas, são realizadas coletas de amostras para caracterização física do solo manualmente. Este trabalho se mostra exaustivo, tendo em vista a heterogeneidade do solo e condições climáticas do local. Ademais, dados coletados diretamente a campo podem apresentar valores imprecisos dada sua grande variabilidade, para se obter dados de forma precisa e rápida. Com isso, simuladores de chuva são alternativas viáveis para estudos envolvendo os processos erosivos.

Simuladores de chuva já são utilizados desde o início do século 20 de forma ampla em determinações de taxas de infiltração e erosão. Com isso, se tornou possível simular chuvas naturais, alternando velocidade de impacto, tamanho das gotas da chuva, intensidade de precipitação e a duração das chuvas intensas (SPOHR et al., 2015; ŠIVANOVIĆ et al., 2022). Sob simulações em laboratório, é possível alterar características de interesse e replicar diversas vezes, sem a necessidade de eventos de chuva natural (CONFESOR; RODRIGUES, 2018; EDEH, MALEK; BUSS, 2020), o que pode melhorar o entendimento dos processos erosivos. Além disto, simuladores de chuva favorecem pesquisas voltadas a modelagem matemática, como foi reportado por Vidaletti (2022).

Objetivo Geral

O objetivo do trabalho foi verificar a influência de níveis de compactação de um Latossolo argiloso, declividades e duração da chuva, nas perdas de água e solo por erosão e no coeficiente de escoamento em simulador de chuva.

Objetivo Específico

Estudar a interação das variáveis densidade, declividade e duração da chuva nas perdas de água e solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Degradação física do solo

O solo se constitui de um sistema trifásico composto por parte sólida (agregados), líquida e gasosa, em que sua estrutura tem principal função atender as demandas das plantas: água, oxigênio, temperatura e resistência à penetração de raízes. A degradação física do solo está ligada à alteração das características que determinam a qualidade de um solo, que será determinada pela interação dos processos que ocorrem neste sistema, resultando em processos de erosão (hídrica ou eólica), desertificação, contaminação dos solos, como a acidificação e salinização.

Guerra e Jorge (2018) apresentaram os fatores de degradação do solo em duas classificações, facilitadores e diretos:

Fatores Facilitadores: topografia do terreno, textura do solo, composição do solo, cobertura vegetal, desmatamento, super pastejo, uso excessivo da vegetação, remoção da cobertura vegetal para cultivo.

Fatores Diretos: intensidade de chuvas, alagamentos, velocidade dos ventos, tráfego de máquinas, condução do gado, entrada excessiva de água ou drenagem insuficiente, uso excessivo de produtos químicos/fertilizantes, deposição de resíduos.

Dentre as categorias de degradação do solo, a FAO (2015), lista sete tipos de degradação, que podem estar relacionadas entre si: erosão hídrica; erosão eólica; salinização; degradação física; degradação química; degradação biológica; desertificação.

No Brasil, a partir da década de 70, houve aumento na adoção de máquinas em áreas agrícolas, impulsionando a deterioração dos solos por pulverização da camada superficial, redução da matéria orgânica e compactação que sucedeu em processos de erosão hídrica, a qual se mostra como principal agente de insustentabilidade dos sistemas (LLANILLO et al., 2006; CONFESOR; RODRIGUES, 2018).

Com a implantação do sistema plantio direto como forma de diminuir os impactos ocasionados pelo plantio convencional (como a erosão), o peso das máquinas e equipamentos e a intensidade de uso do solo têm aumentado, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo. Desta forma, as práticas conservacionistas do solo se mostram como solução para os efeitos da degradação do solo pela exploração dos recursos naturais, diminuindo o revolvimento do solo e redução de compactação no preparo nos cultivos sucessivos (STRECK et al., 2014).

Para o estudo dos processos erosivos, um critério amplamente utilizado é a Equação Universal de Perdas de Solo - USLE (Universal Soil Loss Equation), desenvolvida no Departamento de Agricultura dos EUA. Esse modelo preditivo considera fatores naturais e antrópicos, sendo representada pelo produto de seis fatores expressando resultado em ton/ha.ano (GUEDES et. al, 2022).

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

Sendo:

A -Perda de solo calculada, em ton/ha.ano;

Fator R- erosividade, índice de erosão pela chuva, (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹. ano⁻¹);

Fator K- erodibilidade do solo, em ton. ha.h./ha. (MJ mm);

Fator L- comprimento de rampa (m);

Fator S- do gradiente da declividade em %;

Fator C- adimensional, relacionado à cobertura superficial ou uso/manejo;

Fator P- adimensional, refere-se às práticas conservacionistas.

Waltrick et al. (2015) observaram que o potencial de desagregação da chuva que causa a erosão se define como erosividade (fator R), esta variável é dependente das condições climáticas regionais, o conhecimento deste potencial pode influir em estratégias de manejo e conservação do solo.

2.2 Compactação

Devido a crescente necessidade de produção de alimentos, a mecanização agrícola tornou-se fator essencial para a expansão da produção. Contudo, isso significou incremento do tráfego de máquinas sobre o solo, devido a falta de informação de produtores, buscando superar os limites impostos pelo solo e maior produtividade final, utilizam-se de máquinas e implementos maiores e maior potência exigida, e conseqüentemente mais pesados gerando aumento de cargas sobre o solo, associado a um tempo reduzido para execução das atividades, as operações podem ser executadas fora das condições ideais de umidade causando a compactação e prejudicando a qualidade física do solo.

A compactação influi nas características estruturais do solo, sendo uma relação direta com redução de macroporos, aumento na densidade especialmente na camada de 0,1 - 0,2 m; aumento na resistência do solo à penetração de raízes, déficit na infiltração de água e trocas gasosas, influenciando na absorção de nutrientes por parte da planta e superficialidade de raízes (SECCO, 2004; BERGAMIN et al., 2010;

VALICHESKI et al., 2012). A compactação é influenciada pela textura, umidade do solo e teor de matéria orgânica, sendo que solos com partículas de mesmo tamanho sofrem menores efeitos, mas solos com misturas de areia, silte e argila são mais susceptíveis a mudanças, pois a diferente granulometria imposta a tensões cria um rearranjo de partículas aumentando a densidade e diminuindo a porosidade do solo. Assim, a compactação cessa quando o solo passa a suportar a tensão aplicada sem alterações.

O aumento dos valores da densidade em solos de textura argilosa, como Latossolos, pode influir em impedimento mecânico no crescimento das raízes, as quais passam a se expandir nas camadas mais superficiais ou mais profundas a camada compactada. Para Reichert et al. (2009) e Collares et al. (2008) a densidade crítica deve se manter em $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$, havendo inibição no crescimento de cultura a partir de $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$ na densidade e $2,5 \text{ MPa}$ de resistência a penetração. Já Klein (2006) verificou que a densidade deve apresentar valores próximos de $1,08 \text{ Mg.m}^{-3}$ para o melhor desenvolvimento dos cultivos agrícolas em Latossolos argilosos.

Beulter (2004) e Streck et al. (2004), em experimentos com diferentes níveis de compactação, observaram que as tensões aplicadas pelo tráfego de máquinas concentram-se nas camadas compactadas de $0,05 - 0,15 \text{ m}$, onde há concentração e distribuição de raízes. Costa et al. (2003) mostraram claramente o favorecimento ao desenvolvimento das raízes em camadas com menor densidade, maior porosidade e maior estabilidade de agregados.

O incremento da densidade devido ao tráfego de máquinas afeta também as taxas de infiltração e retenção de água. Chamen (2011) e Chyba et al. (2017) demonstraram que um solo compactado possui infiltração reduzida em até 6 vezes comparado ao solo não trafegado.

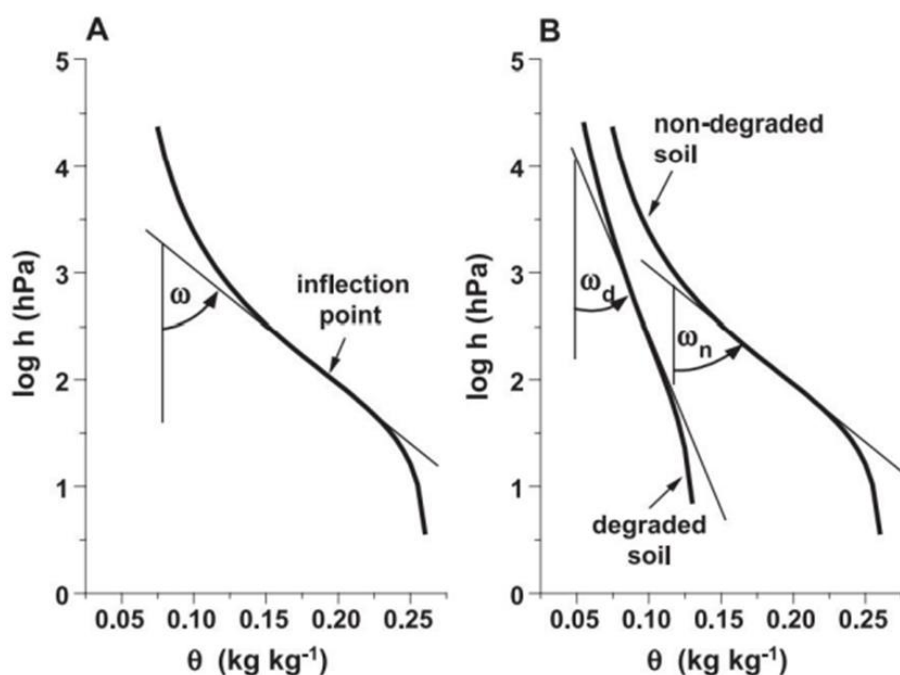


Figura 1. Curva de retenção de água no solo (A); Curvas de retenção de água no solo afetadas por densidades diferentes (B). Fonte: DEXTER (2004).

2.3 Agentes ativos na erosão

Uso intensivo do solo e a retirada da vegetação natural provocam mudanças no ciclo hidrológico do solo, alterando funções como infiltração e armazenamento, redução da capacidade de armazenamento, o que favorece o risco de escoamento e inundações. A infiltração depende da condutividade hidráulica, sendo a textura do solo (proporção de areia, silte e argila) principal fator que influencia (GODOI et al., 2021; PEREIRA et al., 2021; HAGHNAZARI et al., 2022).

A erosão hídrica, refere-se a um processo mecânico envolvendo o impacto causado pelas gotas de chuva sobre a superfície do solo e pelo escoamento superficial, resultando no desprendimento pela energia cinética da gota e carreamento das partículas de solo (PANACHUKI et al., 2011; MARTINS, 2022). Dentre os fatores que afetam a erosão hídrica tem-se: comprimento da rampa (declive), tipo de solo e chuvas (intensidade e duração).

A declividade age como agente passivo da erosão. Em locais planos a erosão é praticamente nula e à medida que a declividade aumenta haverá o favorecimento do carreamento de partículas pela velocidade da enxurrada e redução na infiltração; assim como o comprimento da rampa, pois quanto mais longo o percurso maior a

energia cinética do fluxo e assim maior o efeito da força cisalhante, com potencial de formação de sulcos (CELANTE, 2017; SILVA et al. 2019; VIDALETTI, 2022).

Os Latossolos vermelhos, principal classe de solos do Paraná (LIMA; LIMA; MELO, 2012), possuem predominância de argilominerais do tipo 1:1, como a caulinita (REIS et al., 2014), estes por sua vez, são contemplados pelo grupo de solos que encontram fortemente relacionados à intemperização e lixiviação intensas, responsáveis pelas baixas atividades das argilas; baixa capacidade de troca de cátions; além de profundos, apresentam elevada estabilidade de agregados e baixo conteúdo de silte em relação à argila (KER, 1997), além de apresentarem boa aptidão agrícola.

Em virtude do aumento de produção de grãos e o uso de sistemas intensos de preparo do solo, mesmo solos com predominância de argila sofrem consequências como erosão, perda de matéria orgânica, fertilidade do solo e compactação tem surgido (TORMENA et al., 2004; CELANTE, 2017).

De modo especial, a compactação provoca a redução de infiltração de água no solo, propiciando a erosão hídrica (CELANTE, 2017). O Sul do Brasil possui ocupação significativa de áreas de baixa aptidão agrícola e alta fragilidade ambiental (áreas com grande risco de erosão) com a agricultura familiar. De acordo com Anache et al. (2017), a degradação do solo por erosão hídrica é a mais significativa, apresentando volume de solo perdido variando de 0,1 a 136,0 t ha⁻¹, estimado em função do uso e da cobertura do solo, principalmente em áreas de encosta que apresentam grande susceptibilidade à erosão.

Os fatores intrínsecos a chuva, intensidade e a duração da chuva, tamanho, sentido e velocidade de impacto da gota, e a qualidade da água da chuva exercem efeitos diretos na erosividade da chuva (SPOHR et al. 2015).

Em Cascavel-PR o mês com maior precipitação é outubro, com média de precipitação acumulada de 245 mm em 12 dias chuvosos (IAT, 2023), que representam 20,4 mm/dia.

Em seu estudo, Carvalho et al. (2005) consideraram a chuva como erosiva quando o volume total precipitado era superior a 10 mm ou quando era igual ou superior a 24 mm h⁻¹. Desta forma, a região de Cascavel apresenta chuvas que podem ter efeitos erosivos, sendo importante atentar às condições de conservação do solo.

Waltrick et al. (2015) e Santos et al. (2020) enfatizam que o manejo adequado do solo é importante para reduzir os efeitos de alta erosividade, associados a

condições de relevo e características físico-hídricas do solo; e que períodos de altas pluviosidades, com maior intensidade e frequência elevam o risco da erosão e redução na espessura do solo. Silva et al. (2005), verificaram que houve influência direta em relação ao acréscimo de cobertura na redução na perda de solo, independentemente da intensidade de precipitação.

No trabalho de Oliveira et al. (2018) foi demonstrado a eficiência do gerador climático ClimaBR em estimar a erosividade pluviométrica, o qual utilizando algoritmos para séries pluviométricas sintéticas (simulador) e reais, verificaram chuvas erosivas com precipitação igual ou inferior a 76 mm h⁻¹.

De acordo com Da Silva et al. (2009) e Araújo et al. (2011), a suscetibilidade do solo a erosão hídrica é denominada como erodibilidade do solo, representada pelo fator K, o qual é fundamental para a previsão de perdas de solo. Segundo Bryan (2000) a erodibilidade por apresentar variabilidade temporal e espacial, é definida como uma variável de longo prazo, e não um índice de resposta para um evento específico de precipitação.

Araújo et al. (2011) relatam que a erodibilidade do solo é um atributo intrínseco de cada solo, o qual dependente dos atributos mineralógicos, químicos, morfológicos e físicos. Dentre os principais atributos que afetam a erodibilidade, tem-se a permeabilidade do solo à água, a capacidade de armazenamento de água, a textura, a coesão, o grau e o tipo de estrutura, carbono orgânico, os teores de óxidos de Fe e de Al, e o tipo do mineral de argila (SILVA et al., 2009).

De acordo com Carvalho (2008) citado por Lemos (2010), a erodibilidade do solo pode ser classificada conforme Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de erodibilidade (K)

| Intervalos de valores de erodibilidade (t.ha⁻¹.h.mm⁻¹.ha.MJ⁻¹) | Classes de interpretação |
|--|---------------------------------|
| K ≤ 0,015 | Erodibilidade baixa |
| 0,015 < K ≤ 0,030 | Erodibilidade média |
| K > 0,030 | Erodibilidade alta |

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008) citado por Lemos (2010).

Dentre os fatores do solo importantes a serem considerados na determinação da erodibilidade do solo tem se a textura do solo (PENACHIO, 2021), assim como a matéria orgânica, que devido a capacidade de aumentar a estabilidade dos agregados

e assim reduzir a suscetibilidade ao processo erosivo (BELASRI et al., 2017; JELOUDAR et al., 2018; GHOLOUBI et al., 2018).

2.4 Plantio direto

O solo deve ser capaz de proporcionar à planta um ambiente que forneça água, nutrientes, oxigênio, temperatura e suporte, para que expresse o melhor do seu potencial genético e sua estrutura é resultado do arranjo entre agregados sólidos: minerais e orgânicos. Para o equilíbrio do sistema solo, faz-se necessário o uso de técnicas conservacionistas de manejo, que visem preservar a qualidade estrutural do solo, proporcionar o incremento de material orgânico e não favorecer a compactação ou erosão.

Com estes objetivos foram implementados o cultivo mínimo e plantio direto, em substituição do plantio convencional que favorecia a degradação do solo e processos de erosão devido intenso revolvimento e incorporação da biomassa. A introdução do sistema plantio direto no Brasil iniciou na década de 70, sendo um sistema utilizado em pesquisas acadêmicas e adotado de forma experimental por alguns produtores no Paraná, sendo consolidada em meados da década de 80 (ROCHA et al., 2022).

Sua adaptação foi demorada, pois necessitava de qualificação do agricultor por se tratar de um sistema complexo, além disso, necessitava de máquinas importadas e desenvolvimento de técnicas para controle de pragas e doenças; porém este sistema proporcionou a melhora na qualidade do solo, pois suas principais características são: cobertura do solo com palhada, revolvimento mínimo do solo e rotação de culturas; embora presuma-se que apenas 10% das áreas sob o sistema plantio direto adotem as técnicas corretas para manutenção do sistema (FERNANDES et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2021).

Sua intensa adoção nas regiões produtoras do Paraná trouxeram benefícios como manutenção da matéria orgânica, controle de erosão, redução de custos de produção; embora o manejo inadequado desse sistema tenha apresentado nos Latossolos (solos com elevados níveis de intemperização, predominantes da região) alterações negativas nas propriedades químicas e físicas, como compactação do solo em camadas de 0,05 a 0,3 m, alteração da estabilidade dos agregados, acidez do subsolo, variabilidade na condutividade hidráulica nos horizontes e modificações no sistema radicular (BERTOLLO; LEVIEN, 2019; ROCHA et al., 2022).

Portanto, monitorar as propriedades físicas do solo favorece a aplicação de estratégias que melhorem a qualidade do solo e proporcionem o desenvolvimento adequado as culturas, assim como: uso de plantas de cobertura e rotação de culturas, pois as raízes criam uma rede de bioporos que melhoram a porosidade do solo e reduzem os efeitos negativos da compactação, como apresentado por Tavares et al. (2022); tráfego controlado de máquinas para restrição das faixas compactadas na área de cultivo, não interferindo no desenvolvimento do sistema radicular das plantas; manutenção da cobertura do solo com espécies de cobertura de melhor desempenho, que além de dissipar até 30% a energia de compactação na passagem dos rodados, reduzem riscos de erosão pois protegem o solo contra o impacto da gota e reduzem a velocidade de escoamento (BERTOLLO; LEVIEN, 2019; PEREIRA et al., 2021).

2.5 Tráfego controlado de máquinas

Visando a preservação de recursos naturais e crescimento na produção o planejamento agrícola investe em tecnologias para o uso adequado de máquinas e implementos, uma vez que com o avanço tecnológico e aumento do peso das máquinas agrava o problema da compactação do solo e aumenta as necessidades energéticas, as emissões de CO₂ e as dificuldades no preparo do solo. A agricultura de precisão a fim de contornar estes problemas, recorreu ao emprego do Sistema de Informações Geográficas (SIG), na forma de sensoriamento remoto, telemetria e controle de tráfego (MAGRO E CAVICHIOLI, 2018).

O controle de tráfego é uma prática de manejo onde as mesmas faixas de tráfego são utilizadas todos os anos nos ciclos da cultura, concentrando a compactação em faixas de tráfego controlado, buscando minimizar os efeitos negativos das tensões impostas pelo rodado das máquinas e implementos nas propriedades físicas e mecânicas do solo. Apresenta como vantagens redução nos custos de produção, aumento da produção, aumento na eficiência e eficácia de processos, auxiliando na expansão da fronteira agrícola em que aumentamos a produtividade e melhor utilização de áreas com aptidão agrícola sem desmatamento e utilização de novas áreas (KINGWELL E FUCHSBICHLER, 2011).

Nos trabalhos de Esteban et al. (2020) e Luz et al. (2023), observa-se que operações mecanizadas aliadas ao tráfego controlado provocam alterações nas propriedades físicas e mecânicas do solo em faixas restritas. Portanto, o tráfego controlado é uma estratégia para reduzir os efeitos negativos do tráfego de máquinas

e conseqüentemente a compactação, aumentando a qualidade física do solo, incremento na infiltração de água e conseqüentemente redução no risco de erosão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e descrição do simulador

O experimento foi realizado no Laboratório de Física do solo, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, em simulador de chuvas fixo (Figura 2) desenvolvido por Chang (2022).



Figura 2. Simulador de chuva. Fonte: Vidaletti (2022).

O simulador de chuvas artificiais consiste de uma estrutura metálica com:

A - Caixa de 1x1x0,3 m com fundo perfurado, alocado ao centro, contendo solo;
B- Bico aspersor de cone cheio Quick FullJet, com tamanho de gotas similar ao natural;

C - Guinchos manuais (talha), para estabelecer diferentes declividades;

D - Calhas para coletas do escoamento de água e solo;

- E - Sensores de umidade;
- F - Saída de água que percolada; e
- G - Datalogger.

Para este trabalho foi adicionado uma mangueira na saída da calha (D), afim de facilitar as coletas de água e solo.

Os guinchos manuais (C) são elevados para o estabelecimento de novas declividades, e de acordo com as proporções da caixa do simulador, foram confeccionados blocos de madeira para auxiliar no estabelecimento de cada declividade. A altura dos blocos foi dimensionada de acordo com a Equação 2:

$$h = (Dec * dab)/100 \quad (2)$$

em que h é a altura do bloco, Dec a declividade desejada e dab o comprimento da caixa, que será de 100 cm. Logo, as declividades desejadas de 6, 9, 12 e 18%, correspondem respectivamente a 6, 9, 12 e 18 cm de altura dos blocos.



Figura 3. Blocos de madeira para instalação das declividades.

Para a simulação de chuvas foi utilizado um bico aspersor de cone cheio Quick FullJet escolhido de tal forma que abrangesse a área da caixa do simulador com formação de gotas semelhantes a chuva natural. As características do bico aspersor estão descritas na Tabela 2:

Tabela 2. Características técnicas do bico aspersor

| Capacidade | Vazão do bico | | Tamanho das gotas (mm) | Pressão (bar) | Ângulos de pulverização (°) | | |
|------------|---------------|------------|---------------------------|------------------|--------------------------------|-----|----|
| | (L/min) | (mm/h) | | | 0.5 | 1.5 | 6 |
| 1.5 | 0,49 - 1,9 | 29,4 - 114 | 1 - 5 | 0.4 - 10 | 52 | 65 | 59 |

*catálogo do fabricante (Spraying Systems Co.)

A intensidade de chuva em mm/h bombeada para o bico aspersor é representada pela Equação 3 de Chang (2022):

$$Im = 26,319 * LN(x) - 25,637 \quad (3)$$

Em que 'x' é a pressão indicada no manômetro em mca. Sendo as variáveis escolhidas, intensidade de chuva média de 34 mm/h, com tempos de duração da chuva de 10, 20 e 30 min.

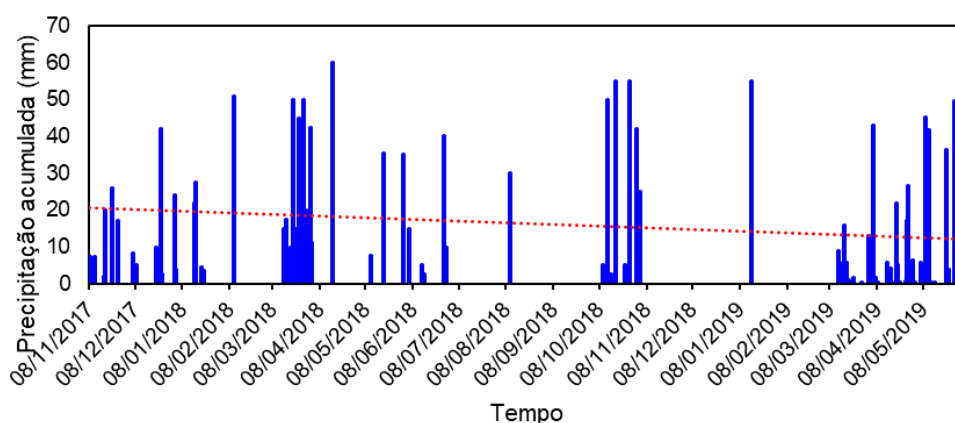


Figura 4. Precipitação diária acumulada na região Oeste do PR 2017/2018 (Chang, 2022).

3.2 Níveis de compactação

Para estabelecer níveis de compactação, confeccionou-se uma caixa de madeira-gradil com tela de malha 3,5 mm com fundo fixado em suporte metálico, com volume interno de 0,081 m³. Essa estrutura com os diferentes valores de densidade do solo, configurando-se como estados de compactação, foi alocada na camada intermediária (0,1- 0,2 m) da caixa de solo do simulador de chuva, para simular condições próximas às condições de campo.

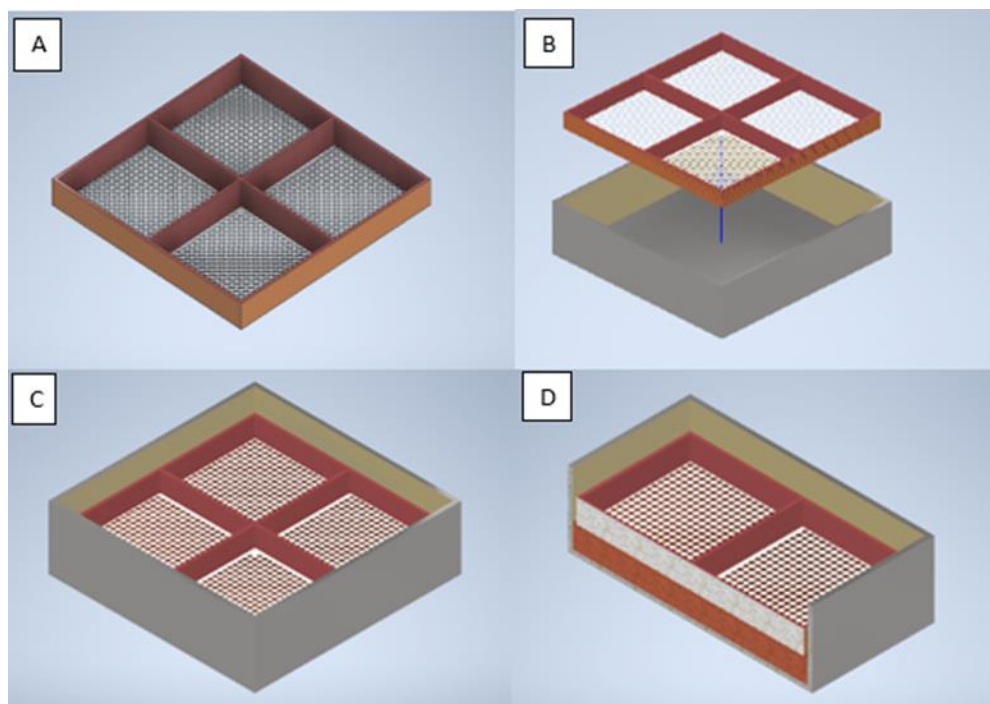


Figura 5. Dispositivo com gradil de acoplamento no simulador de chuva para estabelecimento dos níveis de compactação do solo. A- Gradil de acoplamento; B- Gradil em posição de acoplamento; C – vista geral do conjunto caixa de solo do simulador com gradil acoplado; D-meio corte da vista isométrica do conjunto.

O solo utilizado na caixa do simulador e para o estabelecimento dos níveis de compactação foi coletado no IDR/PR (antigo IAPAR) município de Santa Tereza do Oeste, Paraná, nas coordenadas geográficas latitude 25° 03' 08" S, longitude 53° 37' 59" W, e classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico típico, com textura argilosa a muito argilosa, relevo suave-ondulado, substrato basalto (EMBRAPA, 2018). Foi coletado em camadas estratificadas de: 0 - 0,1 m; 0,01 - 0,2 m e 0,2 - 0,3 m, de modo a replicar as camadas na caixa de solo do simulador, semelhantes às que ocorrem no campo.

Para a instalação do experimento, o solo foi disposto em camadas de 10 cm, utilizando o solo das camadas estratificadas, sendo a densidade de trabalho nas profundidades de 0-10 e 20-30 cm de 1 Mg m^{-3} , enquanto na camada intermediária de 10-20 cm, os níveis de compactação estabelecidos com auxílio do gradil, conforme Figura 2.

Para obtenção da massa de solo a ser adicionada no gradil para estabelecimento dos níveis de compactação foi realizado o cálculo de densidade do solo para cada quadrante do gradil, de acordo com a Equação (4) e (5):

$$D_s = MSS/V_t \quad (4)$$

$$MS_d = MSS * f \quad (5)$$

Em que:

D_s - Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$)

MSS - Massa de solo seco (g)

V_t - Volume da caixa (m^3);

MS_d - Massa de solo com umidade de campo (kg)

f - fator de correção de umidade



Figura 6. Gradil de madeira com quadrantes preenchidos com solo na densidade desejada.

O solo foi disposto com mesma massa nos quadrantes e compactado com auxílio de marreta e tábuas, sob uma lona evitando a perda de solo pela malha da tela, configurando a mesma densidade em cada quadrante. Devido a dificuldade no transporte da caixa pela massa de solo adicionada, foi utilizado um guincho hidráulico de 1 tonelada para a locação da caixa de solo do simulador de chuvas (Figura 7). Ao final do transporte e locação foram ajustadas as bordas da caixa, inserindo solo nos espaços vazios evitando escoamento nas bordas entre a caixa do simulador e gradil.



Figura 7. Transporte do gradil de madeira com auxílio do guincho.

3.3 Determinação das propriedades físicas do solo

Foi realizada a análise granulométrica do solo, determinada com amostras deformadas das profundidades de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol.L}^{-1}$), sendo o teor de argila obtido pelo método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986; OLIVEIRA, 2013). A composição granulométrica segue na Tabela 3.

Tabela 3. Composição granulométrica do solo nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m da área experimental do IDR/Santa Tereza (valores médios de 3 repetições).

| Camada (m) | Frações granulométricas | | |
|------------------|--------------------------------|--------|-------|
| | Areia | Argila | Silte |
| | ----- g.kg ⁻¹ ----- | | |
| 0,0 – 0,1 | 19,1 | 567,6 | 413,3 |
| 0,1 – 0,2 | 18,3 | 670,1 | 311,6 |
| 0,2 – 0,3 | 21,6 | 700,6 | 277,8 |
| Média | 19,6 | 646,1 | 334,2 |

USDA-Soil Conservation Service. Soil Survey Investigations Report n.1. Whashington, 1972.

A densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade e densidade de partículas da camada compactada foram analisadas ao final de cada tratamento, pelo método do anel volumétrico conforme metodologia preconizada pela Embrapa (1997).

Para as análises de porosidade as amostras coletadas nos anéis foram padronizadas pela toaleta (limpeza externa do anel de coleta das amostras) e colocadas em bandeja com 2/3 de água para a saturação das mesmas; foram pesadas (amostra saturada + atilho+ pano) e levadas para a coluna de areia por 72 horas que possui sucção a 0,6 mca e remove a água presente nos macroporos (REINERT; REICHERT, 2006) e posteriormente levadas a estufa a 105°C até peso constante para remover a água contida nos microporos.

3.4 Cobertura do solo

Foi adicionado o equivalente a 10 t.ha⁻¹ (equivalente a 1kg.m⁻²) de massa seca na superfície do solo na simulação. Essa quantidade foi estabelecida como mínimo aceitável para sustentabilidade do sistema plantio direto.



Figura 8. Cultivo de Triticale no IDR Paraná – Santa Tereza.

A palhada escolhida foi a de triticale (*Triticosecale Wittmack*), subproduto de trabalhos anteriores. Para determinar a quantidade necessária fez-se o fator de correção da palhada em estufa de circulação a 105°C até peso constante, determinando a massa a ser inserida pela equação

$$Mp = MPS * f \quad (7)$$

Em que MPS - Massa de palha seca (g), Mp a Massa da palha in natura (g) e F é o fator de correção.



Figura 9. Determinação da umidade da palhada em estufa com circulação forçada

3.5 Coletas de água e solo

Após a instalação de cada nível de densidade das variáveis desejadas, o solo foi coberto com $1\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ de palhada de Triticale e saturado para estabelecer a condição inicial para a simulação das intensidades de chuva em SPD com cobertura de palhada sobre o solo (Figura 10).



Figura 10. Disposição da palha sobre o solo antes da simulação das perdas de água e solo por erosão.

Antes do início de cada análise foi realizada a estabilização do bico, conferindo a pressão de 10 mca e coletando a água por 1 minuto.

A coleta dos dados de perda água e solo em chuvas simuladas teve tempo cronometrado até 30 minutos, sendo perceptível o início do escoamento quando a água começa a formar uma lâmina fina na superfície do solo em direção às calhas. O volume escoado foi coletado com auxílio de baldes com capacidade de 20 litros durante o período de cada duração de chuva, sendo o volume de água escoado medido a cada 10 minutos e acumulado em balde posteriormente, medido com auxílio de proveta graduada de vidro de 2 litros, determinando o coeficiente de escoamento pela razão entre o volume escoado e o volume precipitado.

As perdas de solo foram determinadas por método direto, contabilizadas por meio de latas metálicas previamente pesadas em balança de precisão com 3 casas decimais, em que foi depositado uma subamostra homogeneizada de 50 mL da amostra escoada com solo transportado, levadas à estufa a 105°C até peso constante e pesadas novamente, estimando as perdas em g/ml, multiplicadas pelo volume total escoado e então extrapoladas para $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Entre cada repetição dos diferentes tratamentos, realizou-se uma leve escarificação superficial no sentido perpendicular ao declive, evitando a influência do selamento superficial entre as repetições.



Figura 11. Escarificação superficial do solo após coleta das amostras com rastell manual de jardinagem.

Ao final de cada tratamento de densidade, foram retiradas quatro amostras (uma em cada quadrante do gradil) da camada compactada pelo método do anel volumétrico para determinação das propriedades físicas do solo (densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo). Finalizadas as coletas, foram desligados todos os registros de água e feita a remoção e limpeza do bico, assim como limpeza do simulador de chuvas.

3.6 Caracterização dos tratamentos

O experimento foi constituído de um delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial (4x4x3). Os tratamentos foram quatro níveis compactação, quatro declividades de rampa e três tempos de duração de chuva, intensidade constante de 34 mm.h⁻¹, com 4 repetições, totalizando 192 coletas para caracterização das perdas de água e solo em todos os tratamentos.

3.7 Análises de regressão múltipla e estatísticas

Para determinação do comportamento das variáveis resposta C (coeficiente de escoamento), PA (perda de água) e PS (perda de solo) em função da densidade do solo (Ds), da declividade do terreno (Dec) e da duração da chuva (Dur) e também, para determinar qual das variáveis independentes oferecia maior influência sobre C, PA e PS, foram realizadas análises de regressão múltipla, na qual o objetivo foi determinar uma equação que relacione a variável dependente y a mais de uma variável independente (DEVORE, 2006). O Autor define a equação do modelo de regressão da seguinte forma:

Definição: A equação de modelo de regressão múltipla aditivo geral é:

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \epsilon \quad (8)$$

Em que “ ϵ ” é uma variável aleatória normalmente distribuída.

Para a realização da análise de regressão foi utilizado o Software R (R Core Team, 2020). Foi avaliada a influência conjunta das variáveis Ds e Dec dentro de cada duração da chuva (10, 20 e 30 minutos) em cada uma das variáveis resposta, construindo um modelo de regressão linear múltipla com duas variáveis para a determinação da variável mais influente e do coeficiente de determinação (R²), além

de conhecer o comportamento das variáveis resposta em função da Ds e Dec. Na Equação, os valores $\beta_i, i=1,2,\dots,k$ são os parâmetros do modelo. No entanto, algumas vezes os parâmetros podem não ser significativos, o que indica que eles podem ser retirados do modelo. Desta forma, foi realizado um teste de significância dos parâmetros do modelo com 0,1% de significância também no Software R. Quando os parâmetros foram significativos, pelo teste, eles foram mantidos no modelo, evidenciando que a variável resposta y depende daqueles parâmetros.

Utilizando o pacote scatterplot3d foram construídos os gráficos de dispersão dos dados com a apresentação da superfície resposta.

Tendo em vista que se verificou que a Ds apresentou maior influência sobre as três variáveis resposta (perda de água, perda de solo e coeficiente de enxurrada), foi realizada a análise de regressão em função da Ds, usando o software Sigma 11.0 (Jandel Scientific, Sausalito, CA, EUA)

A análise estatística foi realizada usando delineamento inteiramente ao acaso, em arranjo fatorial. Foi realizado teste de Tukey ao nível de significância $p \leq 0,05$ usando o software SISVAR® (Software de Análise Estatística, UFLA, Lavras, Mg, Brasil).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Interação dos fatores

Na Tabela 4 está apresentado a análise de variância da perda de água (PA), perda de solo (PS) e coeficiente de escoamento (C) de acordo com a densidade do solo e a declividade da rampa.

Tabela 4. Análise de variância da perda de solo (PS), perda de água (PA) e coeficiente de escoamento (C) de acordo com a densidade do solo e a declividade

| Causas da variação | GL | PS | PA | C |
|--------------------|----|------------------------|-----------------------|-----------|
| | | (kg.ha ⁻¹) | (L.ha ⁻¹) | |
| | | Quadrado médio | | |
| Densidade (A) | 3 | 3989,95 ** | 11,98 ** | 595,28 ** |
| Declividade (B) | 3 | 655,06 ** | 13,68 ** | 470,57 ** |
| A * B | 9 | 314,34 ** | 1,15 ** | 62,69 ** |
| Resíduo | 48 | 13,57 | 0,08 | 6,95 |
| Total | 63 | | | |
| CV (%) | | 2,32 | 11,45 | 3,46 |

ns - não significativo; ** - significativo a P = 0,01.

De acordo com a Tabela 4, verifica-se que houve interação entre todos os fatores analisados. A interação entre as variáveis avaliadas (densidade do solo e declividade de rampa) já era esperada em virtude destas variáveis serem preponderantes no estabelecimento da taxa e velocidade de escoamento da enxurrada.

Na Tabela 5, encontram-se os resultados da interação da densidade do solo e a declividade da rampa para perda de solo, perda de água e coeficiente de escoamento.

Para o parâmetro perda de solo, houve incremento na perda de solo (PS) à medida que aumentou os valores de declividade da rampa (Dr) e densidade do solo (Ds), a exceção da densidade de 1,2 Mg.m⁻³ para as declividades 12 e 18%. Verificando que as maiores perdas de solo ocorreram quando a declividade foi de 18% com densidade do solo de 1,4 Mg.m⁻³.

Tabela 5. Interação da densidade do solo e declividade da rampa para perda de solo, perda de água e coeficiente de escoamento

| Declividade (%) | Densidade do solo (Mg.m ⁻³) | | | |
|---|---|----------|----------|----------|
| | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 |
| Perda de solo (kg.ha⁻¹) | | | | |
| 6 | 18,9 bcC | 18,8 abC | 34,0 aB | 47,2 bA |
| 9 | 12,8 cD | 25,4 aC | 35,1 aB | 48,1 bA |
| 12 | 20,5 bC | 17,8 bAB | 25,8 bB | 44,2 bA |
| 18 | 37,9 aC | 14,9bB | 35,9 aB | 77,4 aA |
| DMS _{LC} | 3,46 | | | |
| C.V (%) | 2,32 | | | |
| Perda de água (L.ha⁻¹) | | | | |
| 6 | 9,7 dC | 11,6 cB | 13,5 bA | 12,1 bB |
| 9 | 11,9 cC | 13,3 bC | 13,9 abA | 13,2 aB |
| 12 | 12,6 bC | 13,6 bB | 14,2 aA | 13,1 aB |
| 18 | 13,3 aB | 14,3 aA | 14,3 aA | 13,6 aB |
| DMS _{LC} | 0,5451 | | | |
| C.V (%) | 11,45 | | | |
| Coeficiente de escoamento | | | | |
| 6 | 0,54 cD | 0,67 bC | 0,80 aA | 0,73 bB |
| 9 | 0,68 bB | 0,78 aA | 0,82 aA | 0,79 aA |
| 12 | 0,71 bC | 0,80 aAB | 0,83 aA | 0,78 abB |
| 18 | 0,78 aB | 0,82 aAB | 0,83 aA | 0,82 aAB |
| DMS _{LC} | 4,96 | | | |
| C.V (%) | 3,46 | | | |

Médias de tratamentos seguidas de letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. DMS_{LC}: diferença mínima significativa para linha e coluna. C.V: coeficiente de variação.

Os maiores valores de PS associados aos maiores valores de Dr e Ds já eram esperados em virtude da declividade estabelecer a velocidade de escoamento da enxurrada, o qual contribui para maior capacidade de transporte de partículas do solo. Quanto a Ds limita a taxa de infiltração de água no solo decorrente da redução da

macroporosidade do solo à medida que aumenta a D_s . Estes resultados corroboram com os encontrados por Chyba et al. (2017), Collares et al. (2008), Obour e Ugarte (2021) e Hu et al. (2021) em que o aumento da D_s reduziu o volume de macroporos e conseqüentemente as taxas de infiltração, aumentando as perdas de solo por erosão hídrica; Fox e Bryan (1999) e Vidaletti (2022) tiveram resultados semelhantes, onde o incremento da declividade aumentou a velocidade do escoamento da enxurrada que acarretava numa maior capacidade de transporte de sedimentos do solo.

Para o parâmetro perda de água (PA), ocorreu o aumento da perda de água por erosão à medida que houve incremento dos valores de D_r e D_s . Quanto a densidade do solo, as maiores PA ocorreram na densidade $1,3 \text{ Mg.m}^{-3}$ em detrimento da D_s de $1,4 \text{ Mg.m}^{-3}$. Possivelmente as maiores PA na densidade $1,3 \text{ Mg.m}^{-3}$, estão associadas a redução dos macroporos e/ou selamento superficial do solo, pois a densidade está relacionada ao volume de poros no solo, resultando em menor infiltração e maior perda por escoamento. Estes resultados estão atrelados a perda de solo, em que maiores perdas de água, resultam como consequência em maiores perdas de solo com o volume da enxurrada.

Da mesma forma explicada anteriormente para perda de solo, maiores valores de D_r , associados a maiores valores de D_s , resultam em maiores perdas de água por erosão, devido ao aumento da velocidade de escoamento da enxurrada e conseqüente tensão de cisalhamento, sendo assim o fluxo terá maior capacidade de desagregação e transporte de partículas de solo.

Estes resultados corroboram com Soares et al. (2015) e Vistro et al. (2022), que apresentaram o aumento da densidade em camadas superficiais e subsuperficiais associados a redução da rede de macroporos reduziram a condutividade hidráulica do solo e taxa de infiltração, favorecendo o fluxo preferencial e maior velocidade de escoamento.

Os valores dos coeficientes de escoamento do solo apresentaram o mesmo comportamento das perdas de água, à medida que houve acréscimo nos valores de D_r e D_s , aumentou o coeficiente de escoamento, evidenciado na D_s $1,3 \text{ Mg.m}^{-3}$ e declividade 18%. A taxa de escoamento de água no solo está atrelada a velocidade de escoamento da enxurrada por propiciar desagregação e transporte de partículas em suspensão devido a crescente tensão cisalhante do fluxo concentrado em maiores declividades.

O coeficiente de escoamento também está associado a D_s , onde o incremento nos valores de D_s resultam em menores volumes de macroporos, culminando em menores taxas de infiltração de água no solo; assim como apresentado por Katuwal et al. (2015) e Obour e Ugarte (2021) nos quais maiores densidades diminuem a infiltração e a condutividade hidráulica do solo (K_{sat}), aumentando a velocidade da enxurrada e reduzindo o tempo de escoamento, indicando mudanças na qualidade estrutural do solo.

A Figura 12, apresenta a análise de regressão da macroporosidade, microporosidade e porosidade total em função de valores de densidade do solo, obtidas após ensaios de perda de água e solo na camada de 0,1-0,2 m.

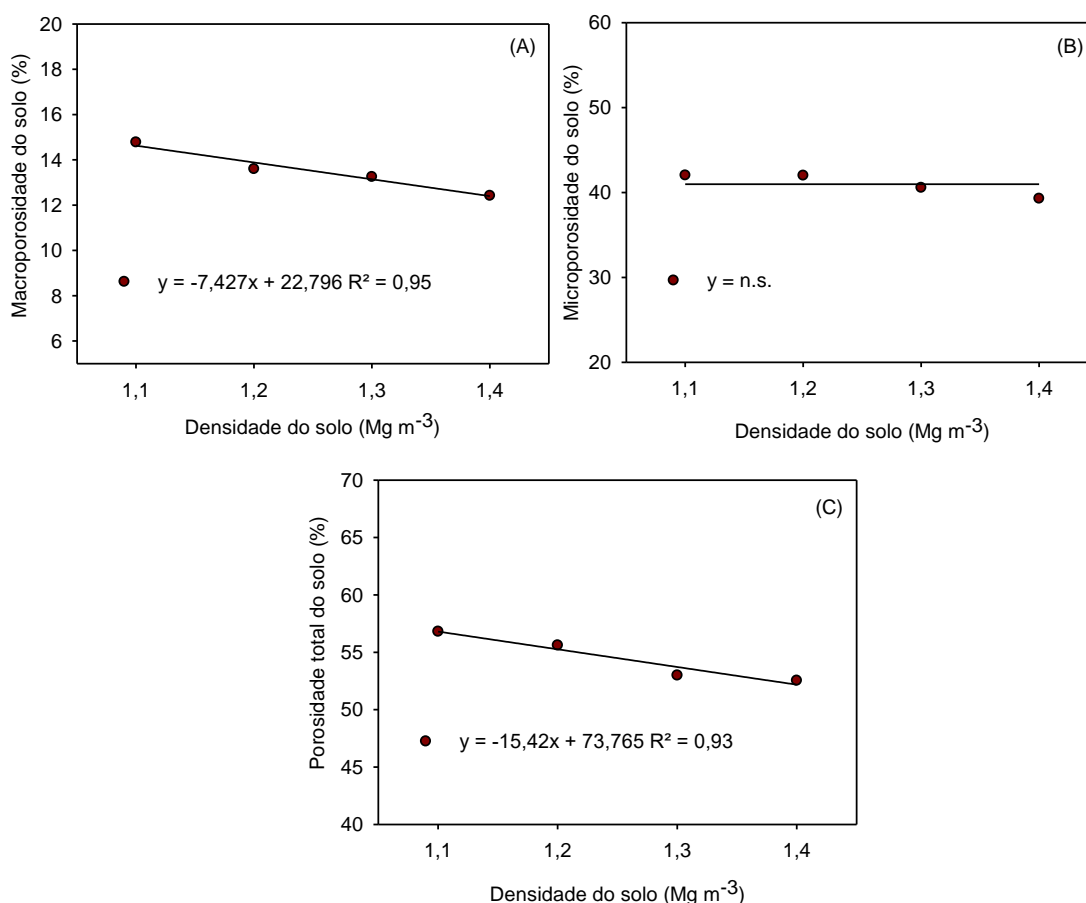


Figura 12. Análise de regressão da macroporosidade (A), microporosidade (B) e porosidade total (C) em função dos valores de densidade do solo da camada de 0,1-0,2 m (valores médios de 4 repetições obtidas após ensaios de perda de água e solo).

Os atributos físicos, macroporosidade (Fig. 12 A) e porosidade total (Fig. 12 C) apresentaram decréscimo linear significativo com o aumento da densidade do solo,

enquanto a microporosidade não apresentou incremento ou redução significativa (Fig. 12 B).

A redução da macroporosidade com o aumento da D_s se deve ao fato da maior concentração de partículas num mesmo volume, com isso, parte do volume de macroporos é expulsa na forma de ar, refletindo negativamente na porosidade total, em especial na macroporosidade do solo.

Assim, com a macroporosidade reduzida, ocorre comprometimento da infiltração de água no solo, refletindo no aumento das perdas de água e na taxa de escoamento, tendo como consequência aumento das perdas de solo por erosão, estando de acordo com o apresentado por Dexter (2004) e Chang (2018).

4.2 Análises de Regressão Múltipla

Para estabelecer o peso dos parâmetros densidade do solo (D_s) e declividade da rampa (Dec) nas equações de predição de perda de solo (PS), perda de água (PA) e no coeficiente de escoamento (C), realizou-se análises de regressão para as chuvas de 10, 20 e 30 minutos de duração. Nas Figuras 13; 14 e 15, encontram-se as superfícies de resposta respectivamente dos valores de perdas de solo (PS), perdas de água (PA) e no coeficiente de escoamento (C) em função dos valores de densidade do solo e declividade da rampa, bem como as equações de predição e coeficientes de determinação, nas três durações de chuva: 10, 20 e 30 minutos.

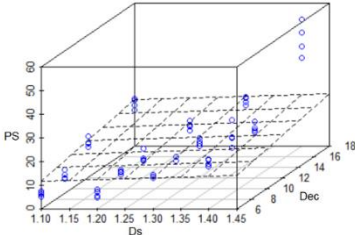
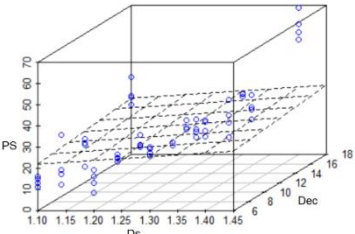
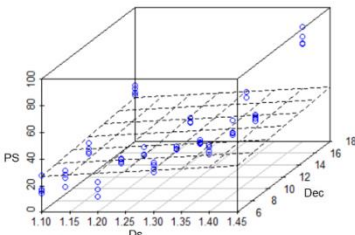
| Duração (minutos) | Superfície de resposta | Equação* | R ² (%) |
|-------------------|---|------------------------|--------------------|
| 10 |  | $PS=7,29 Ds+0,63 Dec$ | 33,89 |
| 20 |  | $PS=18,00 Ds+0,37 Dec$ | 53,85 |
| 30 |  | $PS=22,14 Ds+0,47 Dec$ | 53,20 |

Figura 13. Superfície de resposta dos valores de perda de solo (PS) em função dos valores de densidade do solo (Ds) e declividade da rampa (Dec), equações de predição e coeficiente de determinação (R²), nas três durações de chuva: 10, 20 e 30 minutos. *Os parâmetros da equação foram significativos a 0,1% de significância.

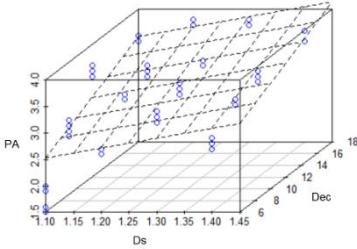
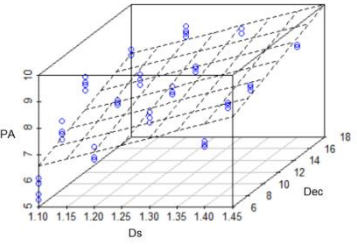
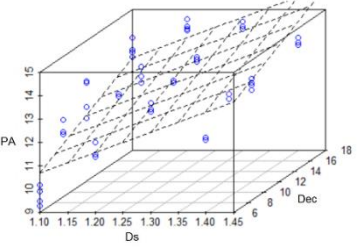
| Duração (minutos) | Superfície de resposta | Equação* | R ² (%) |
|-------------------|---|-----------------------|--------------------|
| 10 |  | $PA=1,87 Ds+0,08 Dec$ | 51,77 |
| 20 |  | $PA=5,26 Ds+0,13 Dec$ | 45,37 |
| 30 |  | $PA=8,70 Ds+0,18 Dec$ | 47,46 |

Figura 14. Superfície de resposta dos valores de perda de água (PA) em função dos valores de densidade do solo (Ds) e declividade da rampa (Dec), equações de predição e coeficiente de determinação (R²), nas três durações de chuva: 10, 20 e 30 minutos. * Os parâmetros da equação foram significativos a 0,1% de significância.

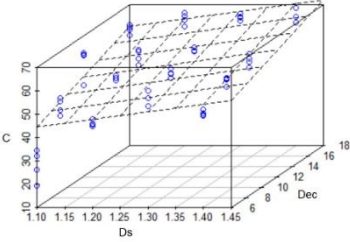
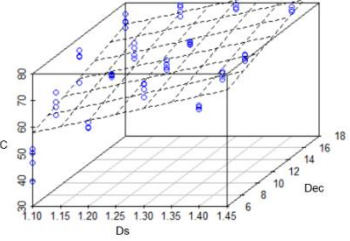
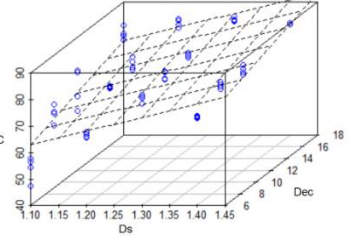
| Duração (minutos) | Superfície de resposta | Equação* | R ² (%) |
|-------------------|--|-----------------------|--------------------|
| 10 |  | $C=32,89 Ds+1,37 Dec$ | 54,70 |
| 20 |  | $C=46,24 Ds+1,17 Dec$ | 52,20 |
| 30 |  | $C=51,48 Ds+1,04 Dec$ | 52,00 |

Figura 15. Superfície de resposta dos valores de coeficiente de escoamento (C) em função dos valores de densidade do solo (Ds) e declividade da rampa (Dec), equações de predição e coeficiente de determinação (R²), nas três durações de chuva: 10, 20 e 30 minutos. * Os parâmetros da equação foram significativos a 0,1% de significância.

Todos os parâmetros das equações de predição da PS, PA e C foram significativos a 0,1% e os valores de R² foram respectivamente de 33,89; 53,85 e 53,20% para PS; 51,77; 45,37 e 47,46% para PA e 54,7; 52,2 e 52% para C, para as durações de chuva de 10, 20 e 30 minutos. Esses valores de R² indicam que em média 47% do que ocorre com a PS; 48% do que ocorre com a PA e 54% do que ocorre com o C, podem ser explicados por estas equações de predição (o R² representa o poder de determinação da equação, quanto maior o R² mais representativa a equação). Em tempo, observando estas equações, para as durações de chuva de 10, 20 e 30 minutos, nota-se que a variável que mais influência no valor de PS, PA e C é a densidade do solo, pois apresentam os maiores valores dos parâmetros das equações, respectivamente de 7,29; 18,00 e 22,14 para a PS; 1,87; 5,26 e 8,70 para a PA e 32,89; 46,24 e 51,48 para o C. Também é possível observar que estes parâmetros das equações de predição são crescentes com o aumento do tempo de duração da chuva, evidenciando assim, a maior importância da densidade do solo em

relação à declividade da rampa, à medida que aumentou o tempo de duração da chuva.

4.3 Análises de regressão simples

Considerando que os coeficientes de determinação nas equações de regressão múltipla não foram elevados, foi realizada uma análise de regressão simples.

4.3.1 - Perda de Solo (PS)

A figura 16 apresenta o comportamento da perda de solo em função da densidade do solo nas declividades de 6, 9, 12 e 18%.

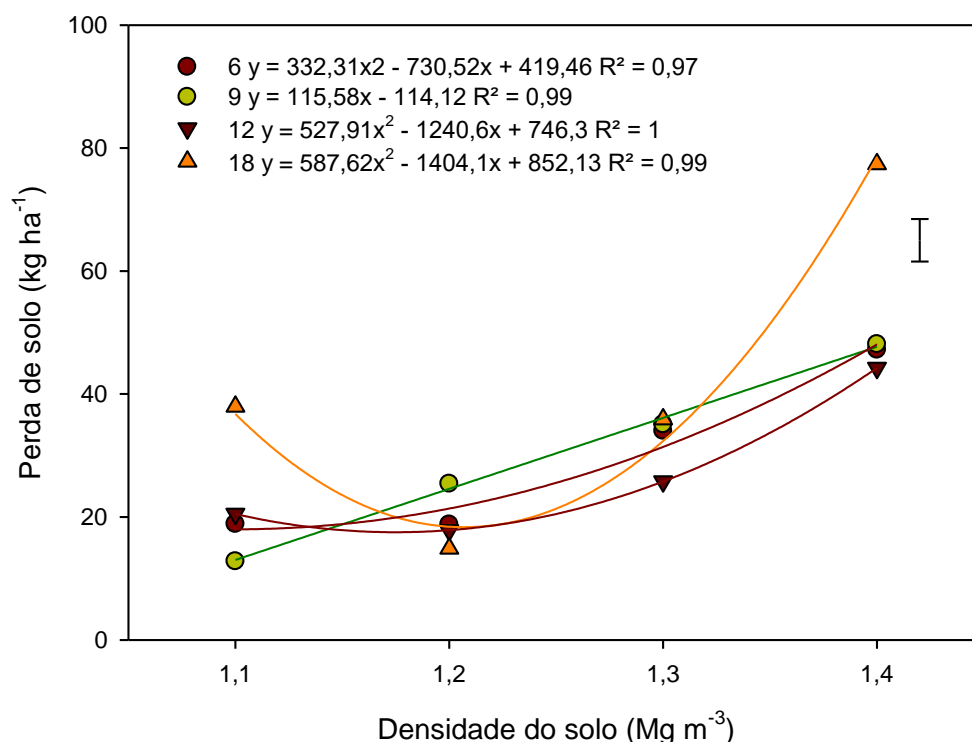


Figura 16. Regressão da perda de solo em função da densidade do solo nas declividades de 6, 9, 12 e 18%.

Verifica-se que as perdas de solo por erosão foram afetadas de forma significativa e direta pelo nível de compactação do solo e pela declividade da rampa (Figura 16). Observa-se também que a declividade da rampa teve pouca variação em relação aos valores de densidade do solo, com exceção da declividade 18% que houve um pico na densidade 1,4 Mg.m-3. Evidenciando que quando o solo está com

alto nível de compactação a declividade da rampa é menos determinante na perda de solo por erosão.

A declividade age como agente passivo da erosão, declividades maiores favorecem do carreamento de partículas pelo aumento da velocidade da enxurrada e redução na infiltração; aumentando proporcionalmente o efeito da força cisalhante com potencial de formação de sulcos (CELANTE, 2017; SILVA et al. 2019; VIDALETTI, 2022).

As perdas de solo por erosão hídrica estão relacionadas diretamente ao desprendimento e deslocamento das partículas de solo causado pelo impacto das gotas de chuva, que pode ser observado para a densidade $1,1 \text{ Mg.m}^{-3}$, em que houve maior perda de solo comparado a $1,2$ e $1,3 \text{ Mg.m}^{-3}$, pois possui menor força de ligação entre as partículas. O manejo adequado pode reduzir a erodibilidade do solo e consequentemente a redução da espessura do solo; a compactação afeta a estabilidade dos agregados e infiltração de água, que favorece as perdas; logo, para a redução destes problemas o incremento de matéria orgânica favorece a estabilidade de agregado assim como aumenta a resiliência, reduzindo efeitos negativos da compactação (WALTRICK et al., 2015; SANTOS et al., 2020; MARTINS, 2022, BELASRI et al., 2017; JELOUDAR et al., 2018; GHOLOUBI et al., 2018).

4.3.2 - Perda de Água (PA)

A figura 17 apresenta o comportamento da perda de água em função da densidade do solo nas declividades de 6, 9, 12 e 18%.

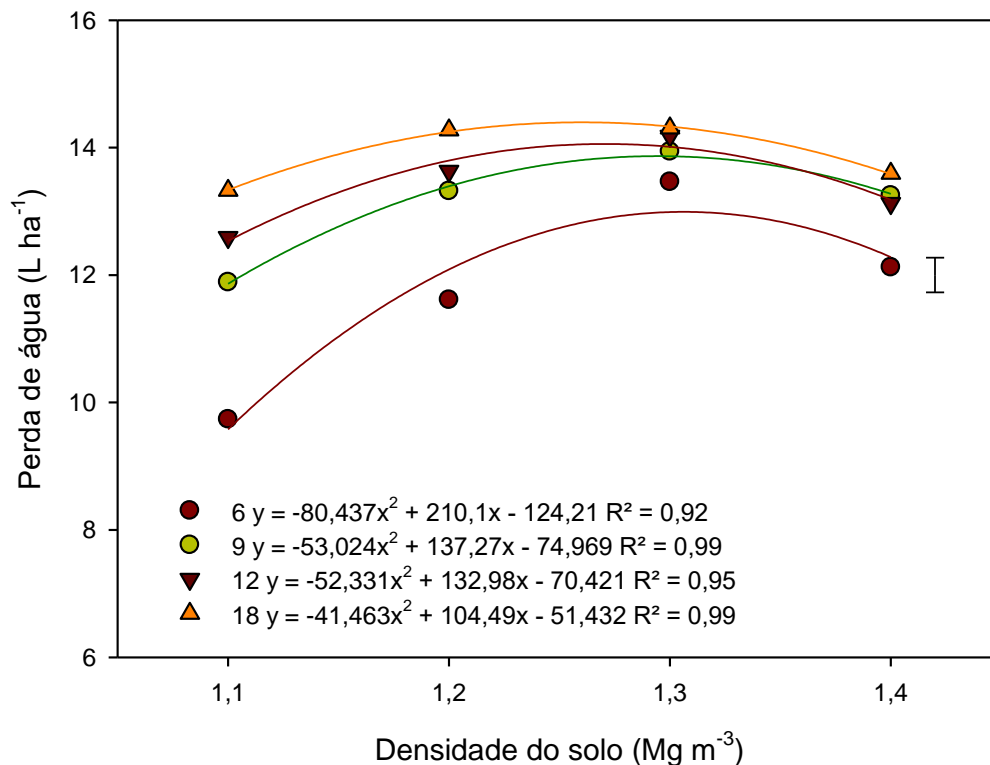


Figura 17. Regressão da perda de água em função da densidade do solo nas declividades de 6, 9, 12 e 18%.

Verifica-se que as perdas de água por erosão foram afetadas de forma significativa e direta pelo nível de compactação do solo e pela declividade da rampa (Figura 17). Observa-se também que nos baixos valores de densidade do solo (1,1 a 1,2 Mg.m⁻³), a perda de água foi mais influenciada pela declividade da rampa em relação aos altos valores de densidade do solo (1,3 a 1,4 Mg.m⁻³), evidenciando que quando o solo está com alto nível de compactação a declividade da rampa é menos determinante na perda de água por erosão.

A degradação física imposta ao solo pela compactação induzida, alteração da declividade, entrada excessiva de água e drenagem insuficiente em processos de erosão hídrica (Guerra e Jorge, 2018); a compactação em níveis superiores a 1,1 Mg.m⁻³ influenciou nas características estruturais do solo, assim como proposto por Klein (2006), principalmente na redução dos macroporos, responsáveis pela infiltração, como observado na Figura 12 (BERGAMIN et al., 2010; VALICHESKI et al., 2012; CHAMEN, 2011; CHYBA et al.; 2017).

Cao et al. (2018) e Zhao et al. (2018) demonstraram que para áreas produtivas, o armazenamento de água em camadas mais profundas do solo (maiores que 30 cm)

se apresenta como fator essencial para desenvolvimento das culturas, principalmente em períodos de estiagem, sendo assim o favorecimento da infiltração de água em períodos de chuva trará benefícios em períodos críticos.

4.3.3 - Coeficiente de escoamento (C)

A figura 18 apresenta o comportamento do coeficiente de escoamento em função da densidade do solo nas declividades de 6, 9, 12 e 18%.

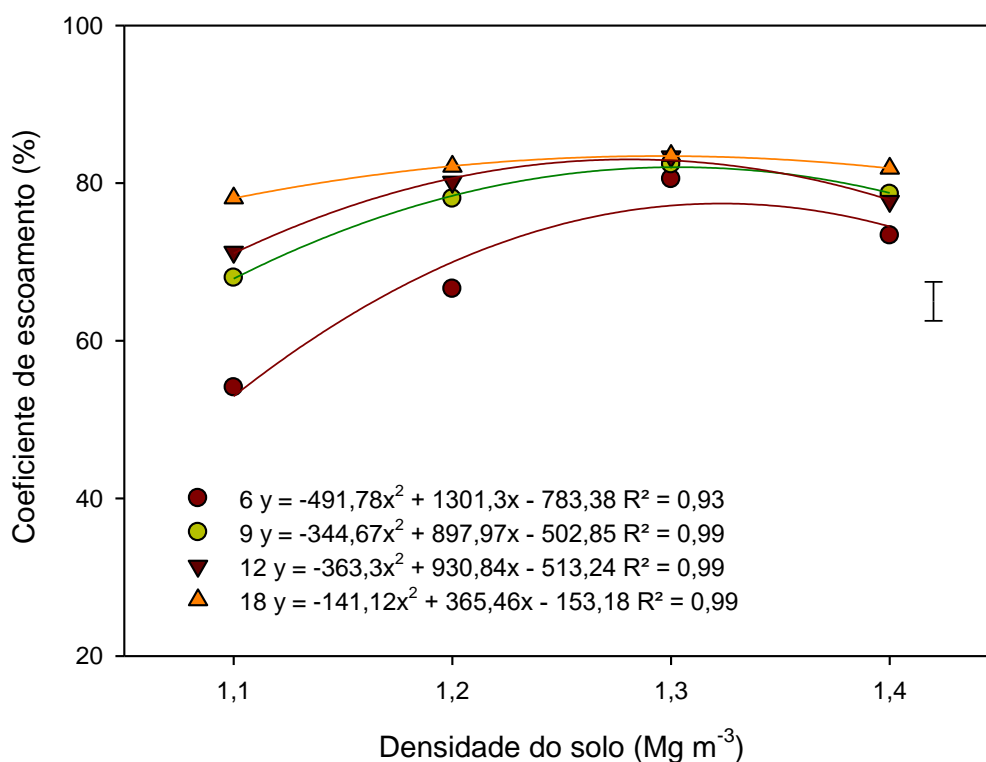


Figura 18. Regressão do coeficiente de escoamento em função da densidade do solo nas declividades de 6, 9, 12 e 18%.

Verifica-se que os coeficientes de escoamento foram afetados de forma significativa e direta pelo nível de compactação do solo e pela declividade da rampa (Figura 18). Observa-se também que nos baixos valores de densidade do solo (1,1 a 1,2 Mg.m^{-3}), o coeficiente de escoamento foi mais influenciado pela declividade da rampa em relação aos altos valores de densidade do solo (1,3 a 1,4 Mg.m^{-3}), evidenciando que quando o solo está com alto nível de compactação a declividade da rampa é menos determinante.

O escoamento superficial está intimamente relacionado com a infiltração de água no solo e tem início quando a capacidade de infiltração do solo é preenchida. Dessa forma, o pico de escoamento ocorreu na densidade $1,3 \text{ Mg.m}^{-3}$, onde a declividade não apresentou diferença significativa; estabilizando em $1,4 \text{ Mg.m}^{-3}$.

Dessa forma, o escoamento superficial é resultante das condições de superfície do solo (tipo de cobertura vegetal, taxa de cobertura do solo e rugosidade ao acaso) e condições físicas do solo em subsuperfície (ENGEL et al., 2009; SPOHR et al., 2009), as quais são alteradas pelo tipo de preparo do solo e espécie cultivada. Assim, logo abaixo da superfície, deve existir condições favoráveis de estrutura do solo, especialmente de porosidade que favoreçam a infiltração de água no solo, com isso haverá armazenamento internamente no solo ou no micro relevo superficial, evitando ou retardando o escoamento dependendo do volume total precipitado.

5. CONCLUSÕES

As perdas de água e solo por erosão, bem como o coeficiente de escoamento foram afetados mais intensamente pela densidade do solo em relação à declividade da rampa à medida que aumentou o tempo de duração da chuva, evidenciando que quando o solo está com alto nível de compactação a declividade da rampa é menos determinante nas perdas de água solo por erosão. Entretanto, nos baixos valores de densidade do solo (até $1,2 \text{ Mg.m}^{-3}$), as perdas de água e solo foram mais influenciadas pela declividade da rampa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; MATOS, A.T. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, [S. l.], v.30, n.6, p. 1046-1049, 2010.

ANACHE, J.A.A.; WENDLAND, E.C.; OLIVEIRA, P.T.S.; FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. **Catena**, v. 152, p. 29-39. 2017.

ARAÚJO, F. S.; SALVIANO, A. A. C.; HOLANDA NETO, M. R. Estimativa da Erodibilidade de Latossolos do Piauí. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 7, n. 10, 2011. Disponível em: <https://www.scienciaplenu.org.br/sp/article/view/358>. Acesso em: 31 ago. 2022.

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 208-218, dez. 2019.

BEULTER, A. N; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.581-588, 2004.

BRYAN, R. B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. **Geomorphology**, v. 32, n. 3, p. 385-415. 2000.

CAO, R.; JIA, X.; HUANG, L.; ZHU, Y.; WU, L.; SHAO, M. Deep soil water storage varies with vegetation type and rainfall amount in the Loess Plateau of China. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-12, 17 ago. 2018. Springer Science and Business Media LLC.

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**, Campina Grande, v. 9, n.1, p. 7-14, 2005.

CATEN, A. T.; MINELLA, J. P. G.; MADRUGA, P. R. A. Desintensificação do uso da terra e sua relação com a erosão do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 1006-1014, 2012.

CELANTE, L. S. **Taxas de perdas de solo e água em um latossolo argiloso sob sistema plantio direto**. 2017. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

CHAMEN, W.C.T. **The effects of low and controlled traffic systems on soil physical properties, yields and the profitability of cereal crops on a range of soil types**. 2011. 305 f. Tese (Doutorado), School of Applied Sciences, Cranfield University, Cranfield, 2011.

CHANG, P. **Modelagem matemática das perdas de água, solo e nutrientes em latossolo argiloso sob sistemas de uso e manejo**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

CHYBA, J.; KROULÍK, M.; KRIĽTOF, K.; MISIEWICZ, P. The influence of agricultural traffic on soil infiltration rates. **Agronomy Research**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 664-673, 2017.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 933-942, jun. 2008.

CONFEA, Instituto Agrônomo do Paraná – Iapar. Disponível em: <https://www.confear.org.br/instituto-agronomico-do-parana-iapar>. Acesso em: 11 dezembro 2021.

CONFESOR, J. G.; RODRIGUES, S. C. Método para calibração, validação e utilização de simuladores de chuvas aplicados a estudos hidrogeomorfológicos em parcelas de erosão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 221-229, jan. 2018.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 27, n. 3, p. 527-535, jun. 2003.

DEVORE, J.L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**, São Paulo, Pioneira, Thomson Learning, 2006.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: part II, friability, tillage, fil-th and hard-setting. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 215-225, 2004.

DOS SANTOS, E. L.; ALMEIDA, L. F. A.; DA PENHA, G. G.; GIOVANELLI, E. M.; ALMEIDA, N. B.; DE ALMEIDA, E. M.; DA SILVA, R. C. Mapeamento do manejo do solo e da água em uma propriedade na Região Oeste do Paraná. **Revista Cultivando o saber**, Paraná, v. 13, n. 1, p. 30-44, 2020.

EDEH, I. G.; MAŁEK, O.; BUSS, W.. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties – New insights and future research challenges. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 714, p. 136857, abr. 2020.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Clima. Disponível em: <https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>. Acesso em: 02 janeiro 2022.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Manual de métodos de análise de solos. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária (2018). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília.

ENGEL, F.L.; BERTOL, I.; RITTER, S.R.; GONZÁLEZ, A. Paz; PAZ-FERREIRO, J.; VÁZQUEZ, E. Vidal. Soil erosion under simulated rainfall in relation to phenological stages of soybeans and tillage methods in Lages, SC, Brazil. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 103, n. 2, p. 216-221, maio 2009.

ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. **Geoderma**, [S.L.], v. 362, p. 114097, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114097>.

FERNANDES, C. H. S.; TEJO, D. P.; ARRUDA, K. M. A. Desenvolvimento do Sistema de Plantio Direto no Brasil: histórico, implantação e culturas utilizadas. **Uniciências**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 83-88, 4 dez. 2019.

FOX, D. M.; BRYAN, R. B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. **Catena**, [S.L.], v. 38, n. 3, p. 211-222, jan. 2000.

FREITAS, M. C. M. A cultura da soja no brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n.12, 2011.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size Analysis. **Soil Science Society Of America, American Society Of Agronomy**., [S.L.], p. 383-411, jan. 1986. <Http://dx.doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>.

GIAROLA, N. F. B.; BRACHTVOGEL, E. L.; FONTANIVA, S.; PEREIRA, R. A.; FIOREZE, S. L. Cultivares de soja sob plantio direto em Latossolo Vermelho compactado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [S. I.], v. 31, n. 4, p. 641-646, 2009.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. Jorge. C.; SANTI, A. L.; LANZANOVA, M. E.; TASCA, A. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. **Revista Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 2, p. 86-96, abr. 2017.

GODOI, R. de F.; RODRIGUES, D. B.B.; BORRELLI, P.; OLIVEIRA, P. T. S.. High-resolution soil erodibility map of Brazil. **Science Of the Total Environment**, [S.L.], v. 781, p. 146673, ago. 2021.

GÖPFERT, H.; ROSSETTI, L. A.; SOUZA, J. Eventos generalizados e segurança agrícola. Brasília: IPEA, 1993. 65p.

GUBIANI, P. I.; VAN LIER, Q.de J.; DRESCHER, M. S.; MEZZOMO, H. C.; VEIGA, C. M. C. Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 100-108, fev. 2015.

GUEDES, F. C.; VIEGAS, J. A.; AGUIAR, M. C. P. Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (USLE) na Bacia Hidrográfica Urbana do Córrego Carneirinhos, na cidade de João Monlevade – MG. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 30094, 29 maio 2022.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. do C. O. (org.). **Degradação dos solos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2018. 320 p.

HAGHNAZARI, F.; SHAHGHOLI, H.; FEIZI, M. Factors affecting the infiltration of agricultural soils: review. **International Journal Of Agronomy And Agricultural Research (Ijaar)**, [s. l], v. 6, n. 5, p. 21-35, maio 2015. Disponível em: <http://www.innspub.net>. Acesso em: 28 nov. 2022.

HU, W.; DREWRY, J.; BEARE, M.; EGER, A.; MÜLLER, K.. Compaction induced soil structural degradation affects productivity and environmental outcomes: a review and new zealand case study. **Geoderma**, [S.L.], v. 395, p. 115035, ago. 2021.

INSTITUTO ÁGUAS E TERRAS - IAT. Instituto das águas do Paraná, 2023. Sistema de informações hidrológicas, relatórios dias de chuva. Disponível em: <http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioDiasChuva.do?action=carregarInterfacelInicial>. Acesso em: 20 nov. 2023.

INSTITUTO ÁGUAS E TERRAS - IAT. Instituto das águas do Paraná, 2023. Sistema de informações hidrológicas, relatórios de totais mensais de precipitação. Disponível em: <http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioTotaisMensaisPrecipitacao.do?action=carregarInterfacelInicial>. Acesso em: 20 nov. 2023.

JELOUDAR, F. Taleshian; SEPANLOU, M. Ghajar; EMADI, M.. Impact of land use change on soil erodibility. **Global Journal Of Environmental Science And Management**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 59-70, jan. 2018. GJESM Publisher. <http://dx.doi.org/10.22034/gjesm.2018.04.01.006>.

KATUWAL, S.; MOLDRUP, P.; LAMANDÉ, M.; TULLER, M.; JONGE, L. W. de. Effects of CT Number Derived Matrix Density on Preferential Flow and Transport in a Macroporous Agricultural Soil. **Vadose Zone Journal**, [S.L.], v. 14, n. 7, p. vzj2015.01.0002, jul. 2015.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, v. 5, p. 17- 40, 1997.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, n. 1, p. 26-32, 2014. Disponível em: <https://www.revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/5379>. Acesso em: 17 dezembro 2021.

KINGWELL, R.; FUCHSBICHLER, A. The whole-farm benefits of controlled traffic farming: an australian appraisal. **Agricultural Systems**, [S.L.], v. 104, n. 7, p. 513-521, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2011.04.001>.

LLANILLO, R. F. et al., Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais, *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 27, n. 2, p. 205-220, abr./jun. 2006

LEMOS, C. F. DE. **Evolução da Erosão na Bacia Hidrográfica do Alto Curso do Rio Pitangui – PR**. 2010. 206 f. Tese (Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <<http://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/25999>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. de F. Conhecendo os principais solos do Paraná: abordagem para professores do ensino fundamental e médio / V. – Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo / Núcleo Estadual do Paraná, v.1, 18 p., 2012.

LUZ, F. B. da; GONZAGA, L. C.; CASTIONI, G. A. F.; LIMA, R. P. de; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Controlled traffic farming maintains soil physical functionality in sugarcane fields. *Geoderma*, [S.L.], v. 432, p. 116427, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116427>.

MAGRO, T.; CAVICHIOLI, F. A. Uso de implementos agrícolas. **SIMTEC - Simpósio de Tecnologia da Fatec Taquaritinga**, v. 4, n. 1, p. 13, maio 2018.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informativo Agropecuário**, Belo Horizonte, 1987. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/475654/1/Compactacaosolo.pdf>. Acesso em: 11 dezembro 2021

MARTINS, M. M. **Modelagem físico-matemática da interação solo-atmosfera e erosão hídrica em bordas de reservatórios**. 2022. xv, 106 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

MONTEIRO, L. I. B. **Pagamento por serviços ambientais e condição de uso intensivo do solo**. 2016. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

NACHTIGALL, S. D.; NUNES, M. C. M.; MOURA-BUENO, J. M.; LIMA, C. L. R. de; MIGUEL, P.; BESKOW, S.; SILVA, T. P. Modelagem espacial da erosão hídrica do solo associada à sazonalidade agroclimática na região sul do Rio Grande do Sul, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 25, n. 6, p. 933-946, dez. 2020.

OBOUR, P. B.; UGARTE, C. M. A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 211, p. 105019, jul. 2021.

OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. DA C.; ROSSETTI, K. DE V.; FERRAUDO, A. S.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. DE S.; JÚNIOR, L. S. B. Qualidade estrutural de um latossolo vermelho submetido à compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 604-612, jun. 2013.

OLIVEIRA, J. P. B. de; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; ZANETTI, S. S.; MOREIRA, M. C. Assessing the use of rainfall synthetic series to estimate rainfall erosivity in Brazil. **Catena**, [S.L.], v. 171, p. 327-336, dez. 2018.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). Status of the World's Soil Resources: Main Report. Rome, 2015.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em latossolo vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 35, n. 5, p. 1777-1786, out. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832011000500032>.

PENACHIO, S. M. **Predição do fator erodibilidade do solo por meio de regressão krigagem**. 2021. 81 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Energia na Agricultura, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2021.

PEREIRA, J. L. da S.; ROSA, J. D.; MEDEIROS, J. C.; LACERDA, J. J. de J.; SOUSA, M. de N. G. de; RODRIGUES, P. C. F.; OLIVEIRA FILHO, E. G. de; SOUSA, D. C. de.

Erosão hídrica em sistemas de preparo do solo sob chuva simulada no cerrado piauiense. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 2342-2356, jan. 2021.

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R. & HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Till**, v. 102, p. 242-254, 2009.

REIS, I. M. S.; MELO, W. J. de; MARQUES JÚNIOR, J.; FERRAUDO, A. S.; MELO, G. M. P. de. Adsorção de cádmio em Latossolos sob vegetação de mata nativa e cultivados¹. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 38, n. 6, p. 1960-1969, dez. 2014.

ROCHA, E. M. de M.; COSTA, R. N. T.; MAPURUNGA, S. M. da S.; CASTRO, P. T. de. Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na superfície e no perfil do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 154-160, ago. 1999.

ROCHA, A. S. da; NÓBREGA, M. T. de; CUNHA, J. E. Caracterização físico-hídrico-químico de Latossolo Vermelho sob sistema de plantio direto no Oeste do Paraná. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 14-27, 2 jul. 2022.

SECCO D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 797-804, 2004.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, C. J.; FERREIRA, M. F. Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.6, p.1811-1820, 2009.

SILVA, J. L. A.; SOUZA, C. A. L. Variáveis hidrossedimentológicas e níveis de degradação ambiental a partir de protocolos de avaliação rápida de rios, entre a baía da palha e o sado no corredor fluvial do Rio Paraguai. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n. 35, e35448, 2019.

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; AMORIM, R. S. S.; PAIVA, K. W. N. Efeito da cobertura nas perdas de solo em um argissolo vermelho-amarelo utilizando simulador de chuva. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 409-419, ago. 2005.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LIMA, J. M. de; FERREIRA, M. M. Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 6, p. 1207-1220, jun. 2000.

Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SOARES, A.; MOLDRUP, P.; VENDELBOE, A. L.; KATUWAL, S.; NORGAARD, T.; DELERUE-MATOS, C.; TULLER, M.; JONGE, L. W. de. Effects of Soil Compaction and Organic Carbon Content on Preferential Flow in Loamy Field Soils. **Soil Science**, [S.L.], v. 180, n. 1, p. 10-20, jan. 2015.

ŠIVANOVIĆ, N.; RONČEVIĆ, V.; SPASIĆ, M.; ĆORLUKA, S.; POLOVINA, S. Construction and calibration of a portable rain simulator designed for the in situ research of soil resistance to erosion. **Soil And Water Research**, [S.L.], v. 17, n. 3, p. 158-169, 15 mar. 2022.

SPOHR, R. B.; CARLESSO, R.; GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G.; PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 74-81, jan/fev. 2009.

SPOHR, R. B.; CORCINI, A. L. M.; PELLEGRIN, J., BONFANTI, J. B.; SOTO, M. F. D.; CARDOSO, T. Desenvolvimento e validação de um simulador de chuvas portátil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 411-417. 2015.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, jun. 2004.

TAVARES, D.D.; SILVA, P. L. F. da; OLIVEIRA, F. P. de; MARTINS, A. F.; SILVA, A. J. da; SOUZA, A. P. de; PEREIRA, W. E.; CAMPOS, M. C. C.. Agregação e coeficiente de vulnerabilidade estrutural de um Latossolo sob plantio direto e adubações nitrogenadas e potássicas. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 18, n. 7, 2022.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J.. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 28, n. 6, p. 1023-1031, dez. 2004.

TOURINO, M. C. C.; REZENDE, P. M.; SALVADOR, N. Espaçamento, densidade e uniformidade de semeadura na produtividade e características agronômicas da soja. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1071-1077, 2002.

VIDALETTI, V. F. **Impacto da cobertura do solo, declividade e precipitação na infiltração e escoamento de água e sedimentos**. 2022. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022.

VISTRO, R. B.; TALPUR, M. A.; SHAIKH, I. A.; MANGRIO, M. A.. Impact of tractor wheels on physical properties of different soil types and the irrigation efficiency of the furrow irrigation method. **Journal Of Water and Land Development**, [S.L.], v. 52, p. 166-171, 2022.

WALTRICK, P. C.; MACHADO, M. A. de M.; DIECKOW, J.; OLIVEIRA, D. Estimativa da erosividade de chuvas no estado do paraná pelo método da pluviometria: atualiza o com dados de 1986 a 2008. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 256-267, fev. 2015.

ZHAO, L.; HOU, R.; WU, F.; KEESSTRA, S. Effect of soil surface roughness on infiltration water, ponding and runoff on tilled soils under rainfall simulation experiments. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 179, n. 1, p. 47-53, jun. 2018.