

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Modelagem de perda de solo como auxílio na tomada de decisão de manejo
durante a renovação de canaviais

Gustavo José Soares

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2023

Gustavo José Soares
Engenheiro Agrônomo

**Modelagem de perda de solo como auxílio na tomada de decisão de
manejo durante a renovação de canaviais**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **GERD SPAROVEK**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Soares, Gustavo José

Modelagem de perda de solo como auxílio na tomada de decisão de manejo durante a reforma de canaviais / Gustavo José Soares. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011.- - Piracicaba, 2023.

73 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Erosão 2. Cana-de-açúcar 3. Renovação de canaviais 4. Modelagem
I. Título

DEDICATÓRIA

aos meus queridos pais Maria Carolina Soares e Nilson Reis Soares, em especial ao meu irmão caçula Arthur Soares, que apesar da pouca idade nos ensina que a beleza da vida está nas coisas mais simples.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por me conceder o dom da vida e me acompanhar durante todos os meus passos.

Ao Prof. Gerd Sparovek, pela orientação durante o mestrado, compreensão e confiança na execução do trabalho mesmo conduzindo o projeto conjuntamente com minhas atividades de trabalho.

Ao Prof. Marcilio Vieira Martins Filho, pela co-orientação, apoio fundamental na execução do trabalho e esclarecimentos de dúvidas durante todo o projeto.

A Gabriela de Oliveira Morandin, minha noiva e companheira de jornada, pelo apoio em todos os momentos de minha vida e em especial pelo companheirismo e apoio em várias etapas desse projeto pessoal.

Aos amigos do Geolab, que contribuíram de forma direta para a execução deste trabalho.

A Usina São Martinho, pela oportunidade a mim concedida de cursar a pós graduação em conjunto com o meu trabalho, conceder a área experimental e recursos para a realização desse projeto pessoal.

A todos os amigos da Usina São Martinho, em especial ao time de Geotecnologias e Topografia (Fabio Migano Peres, Caio Martins Almeida, Rafael Monteiro, Matheus Felício Craveiro e Jorge Ederson Bueno), pelo apoio fundamental na utilização dos softwares e ideias que contribuíram para este projeto.

A Lucas Aguilar Cortez, pelo companheirismo, tutoria e confiança na execução deste trabalho.

A equipe de manutenção agrícola da Usina São Martinho, que se empenhou na reforma e montagem do simulador de chuvas utilizado no trabalho.

A todos os processos da Usina São Martinho, que de certa forma, contribuíram com a execução deste trabalho colocando um pouco de energia de seu dia a dia para que este fosse realizado.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse trabalho, meu **Muito Obrigado !**

EPÍGRAFE

"O solo é a pátria, cultivá-lo é engrandecê-la."

Arthur Torres Filho

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Objetivos gerais, específicos e hipóteses.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. A erosão e a agricultura.....	15
2.2. Erosão hídrica.....	15
2.3. Infiltração de água no solo.....	16
2.4. Modalidades de plantio de cana de açúcar.....	17
2.5. Erosão do solo com cultivo de cana de açúcar (<i>Saccharum sp.</i>).....	18
2.6. Utilização de modelagem para determinação da perda de solo por erosão hídrica.....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1. Caracterização do local.....	21
3.1.1. Localização geográfica.....	21
3.1.2. Declividade.....	21
3.1.3. Manejo da cultura.....	22
3.1.4. Caracterização do solo.....	23
3.2. Delineamento experimental e tratamentos avaliados.....	25
3.3. Softwares utilizados.....	27
3.4. Entradas do modelo WEPP.....	28
3.4.1. Arquivos de relevo e criação do modelo de elevação digital do terreno (MED)...	28
3.4.2. Arquivos de solo.....	29
3.4.3. Arquivos de manejo e cultura.....	30
3.4.4. Arquivos de clima (“Single Storm”).....	34
3.5. Coeficiente de infiltração do solo saturado (ks).....	35
3.6. Densidade do solo.....	35
3.7. Calibração e simulações com o simulador de chuvas tipo Swanson (1965).....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1. Densidade do solo.....	39
4.2. Coeficiente de infiltração (Ks).....	41

4.3. Perdas de solo com chuva simulada e modelagem.....	44
5. CONCLUSÕES	49
6. CONSIDERAÇÕES PARA FUTUROS PROJETOS.....	51
REFERÊNCIAS	53
APÊNDICES	61

RESUMO

Modelagem de perda de solo como auxílio na tomada de decisão de manejo durante a renovação de canaviais

Nas últimas décadas o setor sucroenergético vem passando por uma série de mudanças nos âmbitos legais devido a proibição da despalha a fogo. A pressão político-social levou ao desenvolvimento de máquinas para colheita e transporte da matéria prima. Tal mudança proporcionou aumento significativo do tráfego de máquinas na lavoura e, conseqüentemente, impactos nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Esse aumento levou o setor buscar alternativas para mitigação da compactação gerada pelo excessivo tráfego de máquinas durante todo o ciclo da cultura. A utilização de várias operações de preparo de solo causa desagregação, perda de matéria orgânica e propicia condição favorável à perda de solo. Logo, alternativas de manejo que diminuam a perda de solo durante a renovação de canaviais tem sido estudadas, a exemplo do Método Interrotacional Ocorrendo Simultaneamente (MEIOSI). O presente trabalho objetiva analisar o impacto do tipo de preparo (Convencional, Localizado e Reduzido) na perda de solo e, também, o emprego do MEIOSI como alternativa para sua mitigação. Para tal análise, foi utilizado um simulador de chuvas tipo Swanson para calibração do modelo WEPP®. Também foi realizada análise de densidade do solo e infiltração para entender o comportamento da perda de solo mediante esses dois parâmetros. As práticas de preparo reduziram a densidade do solo em praticamente todos os tratamentos e posições de análise, com detalhe para a entre-linha de plantio em que observa-se redução na faixa de $0,3 \text{ g cm}^{-3}$. A infiltração acompanhou os dados de densidade e também foi maior na entre-linha de plantio após o emprego dos tratamentos, com exceção da linha de plantio, onde houve redução devido ao fenômeno do selamento superficial. Os tratamentos Localizado e Reduzido foram os que apresentaram menor perda de solo ($0,002 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) dentre as modalidades de preparo estudadas e o efeito do MEIOSI foi suprimido devido ao espaçamento entre-plantas utilizado no plantio. Conclui-se que o WEPP pode ser uma ferramenta para modelagem de perda de solo e um bom direcionador de manejo a ser empregado na renovação de canaviais.

Palavras-chave: Erosão, Cana-de-açúcar, Renovação de canaviais, WEPP

ABSTRACT

Soil loss modeling as an aid in management decision-making during the renewal of sugarcane fields

In recent decades, the sugar-energy sector has been going through a series of changes in the legal spheres due to the shutdown of burning straw. Political and social pressure led to the development of machines for harvesting and transporting raw materials. This change contributed to the significant increase in machine traffic in the field and, consequently, to the chemical, physical and biological attributes of the soil. This increase led the sector to seek alternatives to mitigate the compaction generated by excessive machine traffic throughout the crop cycle, through the addition of new soil tillage practices such as subsoiling, linked to the preparation operations already commonly used such as gradation and plowing. The use of various soil preparation operations causes disaggregation, loss of organic matter and a favorable condition for soil loss. Therefore, management alternatives that reduce soil loss during the renewal of sugarcane fields have been studied, such as the Interrotational Method Occurring Simultaneously (MEIOSI). The present work aims to analyze the impact of the type of tillage (Convencional, Localizado and Reduzido) on soil loss and also the use of MEIOSI as an alternative for its mitigation. For this analysis, a Swanson-type rainfall simulator was used to calibrate the WEPP® model. Soil density and infiltration analysis was also carried out to understand the behavior of soil loss through these two parameters. The tillage practices reduced the soil bulk density in practically all treatments and analysis positions, with detail for the planting rows in which a reduction in the range of 0.3 g cm⁻³ is observed. Infiltration followed the density data and was also higher between the rows after the treatments were applied, with the exception of the row, where it occurred due to the phenomenon of superficial sealing. The Localizado treatment showed the lowest soil loss (0.002 kg m⁻² h⁻¹) among the preferred tillage modalities and the effect of MEIOSI was suppressed due to the inter-plant spacing used in planting. It is concluded that WEPP® is a great tool for modeling soil loss and a good management guideline to be used in cane field renewal.

Keywords: Erosion, Sugarcane, Renewal of sugarcane fields, WEPP

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efeito “Splash”. Início do processo erosivo e causador do solamento superficial (Fonte: CARDOSO & CAMPOS, 2009, adaptado de GUERRA, 1998).	17
Figura 2. Relação entre a disponibilidade de dados e a complexidade do modelo na capacidade de prever os eventos (FARIA, 2016), adaptado de Grayson & Bloschl (2001).	20
Figura 3. Representação esquemática da área de estudo, localizada no município brasileiro de Cravinhos, Estado de São Paulo.	21
Figura 4. Modelo de elevação digital das parcelas do ensaio, com declividade média de cada um dos tratamentos (d%), isolinhas de altitude e coordenadas	22
Figura 5. Distribuição das parcelas experimentais na área de estudo e coordenadas de referência no sistema UTM.	25
Figura 6. Esquema do subsolador canteirizado (que descompacta apenas as duas linhas de plantio e a entre-linha central) utilizado para o preparo de solo nos tratamentos Localizado e Convencional. O espaçamento entre as linhas de plantio é o convencional de 1,5 m.	26
Figura 7. Eliminador mecânico de soqueiras utilizado no experimento. A: relha que retira os rizomas da cana-de-açúcar (prof: 0,01 m) e B: conjunto de facas rotativas que destroem os rizomas.	27
Figura 8. Equipamento R6, da marca Trimble®, que realiza o gerorreferenciamento com correção <i>Real Time Kinematic</i> (RTK), utilizado para a validação dos pontos de controle da área em estudo.	28
Figura 9. Localização das coletas de densidade; A: linha; B: centro do canteiro; C:entre-linha. Sendo C a zona de tráfego de máquinas.	36
Figura 10. Representação esquemática do conjunto simulador-Motor estacionário e reservatório de água.	37
Figura 11. Calibração do simulador de chuva com 30 (<i>i30</i>) e 15 (<i>i15</i>) bicos abertos.	37
Figura 12. Densidade do solo no centro do canteiro após a instalação dos tratamentos. As linhas horizontais representam o desvio padrão amostral.	39
Figura 13. Densidade do solo na entre-linha de plantio antes (T0) e após a instalação dos tratamentos (T1). As linhas horizontais representam o desvio padrão amostral.	40
Figura 14. Zona de perturbação do solo (cinza) pela passagem da haste do subsolador a uma profundidade de 0,4 m. Fonte: CASSIANO (2005).	40
Figura 15. Densidade do solo na linha de plantio antes (T0) e após a instalação dos tratamentos (T1).	41
Figura 16. Relação infiltração x Densidade do nas profundidades 0 - 0,6 m. Onde: Azul escuro: 0 – 0,1; Azul claro: 0,1 – 0,2 m; Vermelho: 0,2 – 0,4; Verde: 0,4 – 0,6 m;	43
Figura 17. Curva de infiltração de água no solo durante chuva simulada no tratamento Testemunha com intensidade de 60 mm h-1. Barras verticais: desvio padrão das amostras.	44
Figura 18. Comportamento da perda de solo (kg m-2 h-1) (azul) e coeficiente de infiltração (mm h-1) (preto) no tratamento Testemha ao longo da simulação de chuva com intensidade de 60 mm h-1.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização do LATOSSOLO VERMELHO acriférrico típico da área de estudo onde: Prof.: profundidade amostral (m); M.O. matéria orgânica do solo (g dm ⁻³); pH: potencial hidrogeniônico; P: fósforo extraível (mg dm ⁻³); H + AL: acidez potencia (cmolc dm ⁻³). K: potássio (cmolc dm ⁻³); Ca: cálcio (cmolc dm ⁻³); Mg: magnésio (cmolc dm ⁻³); Al: alumínio (cmolc dm ⁻³); S: soma de bases (K + Ca + Mg); T: capacidade de troca catiônica; V: saturação por bases (%).	24
Tabela 2. Resumo das operações mecanizadas realizadas em cada uma das áreas experimentais.	27
Tabela 3. Informações inseridas no modelo WEPP® para criação do arquivo de solo.	29
Tabela 4. Parâmetros de erodibilidade em sulcos (K _i), erodibilidade entressulcos (K _i) e tensão cisalhante crítica do solo (τ_c), infiltração do solo (k _c), CS é a razão de cobertura vegetal, CKiCS é o calculo conforme eq. 1, e fonte de pesquisa. (1)Juntamente com arquivo pessoal do prof. Marcilio Vieira Martins Filho. ² valor de infiltração calculado durante a chuva simulada. ³ valor de infiltração obtido pela metodologia BEST (LASSABATÈRE et al., 2006);	30
Tabela 5. Parâmetros de cultura (cana de açúcar) utilizados para modelagem da perda de solo.	31
Tabela 6. Parâmetros de operações simuladas em todos os tratamentos empregados no experimento.	33
Tabela 7. Parâmetros de clima utilizados para a simulação de chuvas no software WEPP®. Série de 10 anos obtidos a partir de estação automática próximo à área de estudo. Onde: Tmax: média das temperaturas máximas mensais observadas (°C); Tmin: média das temperaturas mínimas mensais observadas (°C); Ω : média da radiação solar mensal (W m ⁻²) e P: precipitação média mensal (mm).	34
Tabela 8. Coeficiente de infiltração (mm h ⁻¹) medido de acordo com a metodologia BEST (LASSABATÈRE et al., 2006).	42
Tabela 9. Perdas de solo (kg m ⁻² h ⁻¹) mensuradas com o simulador de chuvas tipo Swanson e modeladas com o WEPP® e infiltração do solo calculada com o simulador de chuvas (K _s S) e medido com a metodologia BEST® (K _s B).	44
Tabela 10. Enxurrada (m ³ ha ⁻¹ h ⁻¹) mensurada com o simulador de chuvas tipo Swanson e modeladas com o WEPP® e infiltração do solo calculada com o simulador de chuvas (K _s S) e medido com a metodologia BEST® (K _s B).	46

1. INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético do Brasil vem passando por inúmeras mudanças nas últimas décadas, seja no âmbito de políticas públicas ou no manejo empregado na cultura. Cada vez mais é possível observar o avanço da mecanização na cultura da cana-de-açúcar o que acarreta em mudanças no ecossistema, principalmente nas características física, química e biológicas do solo. A colheita é a operação que mais impacta no âmbito de manejo, sendo o seu emprego crescente principalmente após a elaboração do protocolo ambiental paulista em 2007, que incentiva a colheita da cultura sem a despalha a fogo, prática até então comum a todas as unidades do país. Com a adoção da colheita mecanizada houve um aumento na quantidade de máquinas, assim como a massa das mesmas, que transitam sobre o canavial e as folhas senescentes da cultura passaram a ser depositadas sobre o solo, alterando o microclima local e o comportamento do solo, planta, fertilizantes e defensivos utilizados. Dentro desse contexto a conservação do solo e da água tem papel fundamental na definição da melhor sistematização das quadras ou “talhões” de forma que permita bom rendimento operacional para a colheita bem como mitigar a ocorrência de processos erosivos.

A cana de açúcar é uma cultura que apresenta elevado potencial conservacionista do ponto de vista de erosão, devido principalmente a elevada cobertura vegetal proporcionada pelo dossel e também pelo sistema radicular fasciculado, que explora grande volume de solo e auxilia na agregação e estruturação do mesmo. Além disso, a região centro-sul do Brasil que tradicionalmente cultiva cana-de-açúcar, realiza a colheita entre os meses de abril a novembro o que faz com que nos meses de maior intensidade pluviométrica o solo permaneça coberto pelo dossel da cultura em pleno desenvolvimento. O maior risco do ponto de vista conservacionista é observado na reforma do canavial, quando os rizomas presentes no horizonte de superfície são removidos e o solo é preparado para posterior plantio. Durante a reforma do canavial, dependendo do manejo empregado em cada unidade de produção, são realizadas uma série de operações com o objetivo de preparar o solo do ponto de vista nutricional e físico, para o desenvolvimento do novo canavial e essas operações acarretam na desestruturação do solo e aumentam o risco de ocorrência de processos erosivos caso realizadas sem o devido acompanhamento técnico. O plantio pode ser realizado durante todo o ano civil, porém há uma tendência de sua realização entre os meses de janeiro a março, devido a maior produtividade agrícola quando o plantio é realizado entre esses meses.

Uma das técnicas que vêm sendo empregada com o objetivo de atenuar o custo do plantio bem como permitir o plantio entre os meses de maior intensidade pluviométrica é o método interrotacional ocorrendo simultaneamente (MEIOSI) no qual são plantadas, com utilização de sistema de posicionamento global (GPS) acoplado aos tratores, as linhas que serão utilizadas como mudas e o restante da área fica passível de ser utilizado para outras finalidades, como rotação de culturas, manejo de plantas daninhas ou cultivo de plantas de interesse econômico. Dessa forma, há várias opções de culturas de cobertura, sendo a escolha feita com base no interesse econômico de acordo com a região, na capacidade operacional do produtor e no tipo de solo predominante no local. Além da variação observada na cultura de cobertura é possível observar variações no espaçamento entre as ruas de plantio com finalidade de produção de mudas, o que impacta na dinâmica da água no solo e na ocorrência de processos erosivos, uma vez que há a hipótese de que essas linhas funcionam como cordões vegetados que permitem a infiltração de água no solo e interceptam o fluxo de enxurrada. Têm-se observado um acréscimo na adoção da técnica de MEIOSI nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do país, porém carecem estudos técnicos do impacto da adoção dessa tecnologia na conservação do solo e da água.

1.1. Objetivos gerais, específicos e hipóteses

Este trabalho possui um objetivo geral que é avaliar a aplicação do modelo de predição da erosão hídrica WEPP® para simulação de cenários de manejo durante a renovação de canaviais.

Este trabalho possui dois objetivos específicos: estudar o impacto do tipo de preparo de solo na densidade do solo, infiltração e perdas de solo; e estabelecer uma relação entre o comportamento físico do solo decorrente das operações de preparo e a perda de solo por erosão.

As hipóteses são as seguintes:

- (1) Os preparos de solo reduzidos apresentam menor erosão do que preparos convencionais com elevada desagregação do solo.
- (2) A metodologia de plantio MEIOSI possui um efeito benéfico na redução da perda do solo.
- (3) As operações de preparo de solo possibilitam aumento da infiltração de água no solo.
- (4) A subsolagem reduz a densidade do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A erosão e a agricultura

O solo é um recurso natural não renovável e deve cumprir funções econômicas, ambientais e sociais. A degradação do solo pode ser entendida como a perda de uma ou mais dessas funcionalidades e isso ocorre devido a diversos fenômenos, como: erosão, contaminação, acidificação, salinização, compactação, desertificação entre outros (FAO, 2015). Dentre os fenômenos mencionados a erosão é o que mais contribui para a degradação do solo no mundo (BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, 2019). Estima-se que no mundo são perdidos cerca de 75 bilhões de toneladas de solo por erosão hídrica e eólica a cada (PIMENTEL et al., 1995).

A erosão, seja ela hídrica ou eólica, é um processo natural e fundamental para a formação da paisagem tal como a conhecemos hoje (MARTINI L. C. P.; UBERTI, A. A. A.; SCHEIBE, L. F.; COMIN, J. J.; DE OLIVEIRA, 2006). Porém quando a mesma ocorre em uma velocidade maior do que a de formação do solo, torna-se um problema, podendo comprometer toda a capacidade produtiva do ecossistema, além dos danos ambientais e sociais associados (FAO, 2015). A erosão antrópica, aquela que é evidenciada mediante as alterações no ecossistema realizadas pelo homem, é a principal responsável pelo aumento na perda de solo observadas as perdas em áreas agrícolas da ordem de $26,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, contrapondo a formação de $1,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de solo a partir de material não consolidado (COGO, 1988).

Em países de clima tropical é mais frequente encontrarmos relatos de erosão hídrica do que eólica devido a maior incidência de chuvas nessas latitudes. Por conta disso há uma busca por ferramentas de manejo que possibilitem a redução do escoamento superficial e, conseqüentemente, a perda de solo. Não há uma metodologia definida para quantificar o impacto das perdas de solo na agricultura, mas com frequência autores tem observado uma relação direta entre erosão e produtividade agrícola (ESWARAN, H.; LAL, R.; REICH, 2001). Por outro lado, alguns autores desenvolveram metodologias, levando em conta parâmetros indiretos para calcular o impacto econômico da erosão hídrica e eólica na agricultura e os valores encontrados foram de US\$ 17,013 milhões por ano, levando em conta impactos ambientais, sociais e econômicos (PIMENTEL et al., 1995). Estima-se que a erosão movimentada cerca de 100 Gt de solo por ano no planeta e esse movimento de sedimento, sempre ocorre do perfil mais superficial (de maior interesse agrônomo) para os de maior profundidade, o que explica as perdas de produtividade potencial já mencionadas (BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, 2019).

A legislação sobre conservação do solo no estado de São Paulo classifica a erosão em laminar ou em sulcos. Para cada tipo de erosão o dano é avaliado de acordo com a severidade do evento, sendo a laminar classificada em: laminar ligeira, moderada, severa, muito severa e extremamente severa; e em sulcos, de acordo com a ocorrência, em: sulcos superficiais, rasos, profundos e muito profundos (DE MARIA. et al., 2016).

2.2. Erosão hídrica

A erosão, seja ela hídrica ou eólica, ocorre devido a movimentação de uma determinada massa de solo para um local diferente do inicial, sendo esse processo irreversível (BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, 2019). Esse processo pode ser dividido em desagregação, transporte e deposição, podendo ocorrer os três concomitantemente na mesma bacia (ELISSON, 1947). Entre os fatores que desencadeiam o processo erosivo (fase

de desagregação) destaca-se o impacto da gota da água da chuva, que possui elevada energia cinética e, conseqüentemente, elevada potencial de desagregação do solo quanto maior a intensidade do evento climático (BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, 2019). Em países de clima tropical destaca-se a erosão hídrica devido ao maior volume de chuvas. Além disso, nos trópicos evidencia-se menor pressão atmosférica o que diminui a velocidade dos ventos e, conseqüentemente, sua erosividade.

2.3. Infiltração de água no solo

A infiltração de água no solo ou coeficiente de infiltração (K_s) determina a velocidade com a qual a água percorre os horizontes do solo e seu entendimento é fundamental para a adoção de práticas conservacionistas que visam mitigar a perda de solo. O K_s é influenciado por todas as práticas de manejo adotadas no solo e é responsável pela regulação de todo o fluxo hídrico na microbacia, abastecimento de aquíferos, redução do escoamento superficial, logo por boa parte dos serviços ecossistêmicos do solo (CARVALHO et al., 2022). Estudos de infiltração de água no solo também são utilizados para o dimensionamento de drenagem em estruturas civis como barragens, loteamentos e são de suma importância para a manutenção das mesmas.

Há diversas formas de mensurar o coeficiente de infiltração de água no solo, desde modelos que levam em conta aspectos já conhecidos do solo ou testes empregados no campo para sua determinação. A maior parte das metodologias empregadas para avaliação em campo consiste na utilização de um anel de área conhecida seguido por sucessivas inserções de água conhecida em seu interior, como a metodologia Beerkan (BEST) (LASSABATÈRE et al., 2006). Os métodos de quantificação com anéis, em sua maior parte, desconsideram ou subestimam o efeito do selamento superficial, que é a diminuição da infiltração de água no solo devido à deposição de partículas na superfície. Essas partículas provêm da desagregação dos agregados do solo ocasionada pela própria gota da água da chuva; esse efeito de desagregação é chamado efeito “Splash” e também é o início do processo de erosão hídrica (CARDOSO & CAMPOS, 2009) (Figura 1).



Figura 1. Efeito “Splash”. Início do processo erosivo e causador do selamento superficial (Fonte: CARDOSO & CAMPOS, 2009, adaptado de GUERRA, 1998).

Durante o processo de selamento há diminuição da macroporosidade do solo devido às partículas depositadas na superfície o que também pode ser provocado pelo manejo inadequado do solo como a execução de operações que já proporcionam a desagregação das partículas, a exemplo do preparo convencional (SCHAEFER et al., 2002). O selamento superficial diminui consideravelmente a infiltração de água à medida que eventos sucessivos de chuva incidem sobre o solo, independente da textura ou condições iniciais do solo cultivado. Porém, quanto maior a intensidade do evento, maior é a energia cinética das gotas da água de chuva e, conseqüentemente, maior o selamento superficial e a perda de solo (REICHERT & CABEDA, 1992).

Estudos têm mostrado que a cobertura vegetal é uma importante aliada na redução de processos erosivos e também contribui para a atenuação do selamento superficial e seus efeitos. A cobertura do solo dissipa a energia cinética da gota da água da chuva e faz com que a água incida sobre o solo com menor energia, propiciando menor selamento superficial e manutenção da porosidade do solo, por conseqüência, maior infiltração quando comparado a solos sem cobertura (SOBRINHO et al., 2003).

2.4. Modalidades de plantio de cana de açúcar

A cultura da cana-de-açúcar apresenta propagação principalmente vegetativa, sendo a propagação sexuada utilizada apenas para melhoramento genético e desenvolvimento de novos cultivares (P. R. C. CASTRO, 2016). Essa propagação é realizada de forma manual ou mecanizada, de acordo com a especificidade de cada unidade de produção. Uma metodologia de plantio que as unidades produtoras têm adotado é o MEIOSI (Método Interrotacional Ocorrendo Simultaneamente), que consiste na produção da muda no próprio local de plantio, o que promove redução de custo no processo além de permitir o cultivo de uma planta de interesse econômico ou de cobertura na área reservada ao posterior plantio (DIAS et al., 1995). A adoção deste sistema de plantio por parte do

setor sucroenergético tem sido crescente ao longo dos últimos anos, porém carecem na literatura estudos que avaliem o impacto dessa mudança no sistema de plantio na conservação do solo e da água.

2.5. Erosão do solo com cultivo de cana de açúcar (*Saccharum sp.*)

A cana de açúcar (*Saccharum sp.*) é uma cultura perene pertencente a família botânica Poaceae e que representa elevada importância nacional devido a sua utilização como matéria prima para a produção de álcool, açúcar e energia. Com relação à morfologia da planta, apresenta sistema radicular fasciculado e que explora grande volume de solo, colmo dividido em “nós” (onde estão presentes todas as estruturas para formação de uma nova planta) e “entre-nós” e crescimento por meio de touceiras, na qual cada perfilho possui seu próprio sistema radicular (CASTRO, 2016; SMITH et al., 2005). O plantio usualmente é realizado em linhas, respeitando ou não as curvas de nível da bacia e o ciclo médio de cultivo no Brasil é de cerca de 3,7 anos (MARIN, 2019).

Com relação ao manejo da cultura houve uma grande mudança nas últimas duas décadas, principalmente por conta de uma pressão social pelo fim da despalha de fogo em meados dos anos 2000 (ALMEIDA, 2000). Devido a essa pressão social, surgiram uma série de medidas para redução da despalha a fogo como o protocolo ambiental paulista em 2007, o que incentivou o setor a desenvolver mais rapidamente máquinas para colheita mecanizada atingindo 98% da área colhida no estado de São Paulo nessa modalidade em 2020 (UNICA, 2020) e também, busca por áreas de melhor topografia que permitam a mecanização como a região centro-oeste do país, onde foi observada elevada expansão da cultura entre os anos 2000 e 2006 (SPAROVEK et al., 2009). Esse aumento de área colhida mecanicamente aumentou consideravelmente o tráfego de máquinas na área de cultivo, mas também passou a depositar cerca de 7 a 15 toneladas de resíduo vegetal no solo, dependendo do cultivar e produtividade da cultura, o que interfere diretamente na ocorrência de processos erosivos, sendo que o resíduo vegetal reduz o tempo necessário para início do escoamento superficial (VALIM et al., 2016). Estudos relatam redução de até 89% na quantidade de solo perdido quando é realizada a deposição de resíduos de forma a cobrir 100% do solo (MARTINS FILHO et al., 2009).

Devido ao aumento considerável no trânsito de máquinas para a colheita de cana-de-açúcar sem despalha a fogo, fez-se necessária a avaliação do impacto gerado sobre o solo, uma vez que além da colheita, todo o manejo da cultura teria de se adequar à nova modalidade de colheita. O principal impacto já observado sobre o solo, diz respeito aos atributos físicos, uma vez que, devido a grande biomassa produzida pela cultura, fez-se necessário a elaboração de máquinas com elevado peso para que seja possível a sua colheita e transporte, o que pode alterar os atributos físicos do solo até a profundidade de 0,3 m, a depender da ordem de solo e das condições de umidade do solo durante a colheita (SOUZA et al., 2005). Essas alterações físicas impedem o crescimento radicular, reduzem a infiltração de água, aeração e, conseqüentemente, desencadeiam um cenário favorável ao aumento dos processos erosivos, o que é observado também em áreas de expansão da cultura (CHERUBIN et al., 2016). Com o objetivo de mitigar o impacto gerado pelo trânsito de máquinas, foram desenvolvidas algumas técnicas para redução da densidade do solo a exemplo da subsolagem, operação realizada durante a reforma do canavial que consiste na utilização de um implemento com hastes acoplado a um trator que cultiva a uma profundidade constante e variável no setor, podendo alcançar até 0,6 m a depender das orientações operacionais (CORTEZ, 2013). O emprego da subsolagem tornou-se rotina no setor sucroenergético adicionado às práticas de preparo de solo já utilizadas de gradagem e aração, práticas essas, que já tem como resultado elevada desagregação de solo e, conseqüentemente, aumento da erosão (PAULA, 2015).

Em resposta às modificações físicas mencionadas, uma série de tecnologias foram avaliadas com o intuito de mitigar o impacto da compactação do solo promovida pelo trânsito das máquinas agrícolas; uma delas é a utilização de sistemas canteirizados de preparo de solo que consistem na concentração das operações apenas nas linhas de plantio, visto que a zona de tráfego será compactada logo na primeira operação que sucede a subsolagem. Esses trabalhos têm mostrado bons resultados no desenvolvimento radicular e eficiência da correção de solo, visto que parte desses implementos realizam a aplicação de corretivos em profundidade (C. C. DE LIMA et al., 2015). Porém, o efeito de descompactação ao longo do ciclo da cultura é discutível uma vez que a diminuição da densidade do solo ocorre logo após execução da operação. Ao longo do ciclo estabelecido da cultura os agregados do solo se rearranjam e podem promover o aumento da densidade, além da transferência da compactação para as camadas abaixo da zona de preparo logo após sua execução (MARASCA et al., 2015).

Trabalhos com o intuito de reduzir o número de operações de preparo de solo vem sendo desenvolvidos com o objetivo de melhorar as condições do solo e reduzir a emissão de gases de efeito estufa e custos operacionais. Um exemplo claro é a não utilização de grade e arado nas operações de preparo de solo, operações estas que causam impacto direto na agregação do solo, principalmente nas camadas superficiais (PAULA, 2015). Além disso, a não utilização dessas operações, aliada a utilização de piloto automático, é possível mediante a tomada de uma série de decisões técnicas e avaliação das condições do solo para a sua execução. Os benefícios da redução de desagregação permitem um ambiente melhor ao desenvolvimento radicular, além do aumento da porosidade, fatores estes que impactam diretamente na perda de solo (DA LUZ et al., 2022).

Recentemente vem sendo desenvolvidas uma série de trabalhos com o objetivo de implantar o sistema de plantio direto em cana-de-açúcar. O sistema de plantio direto já é amplamente utilizado em culturas anuais, e traz uma série de benefícios físicos, químicos e biológicos para o solo. Um ponto a ser analisado é o que o efeito da diminuição da densidade do solo não é observado ao longo do ciclo, apenas durante o início do estabelecimento da cultura e isso pode demonstrar que o tipo de preparo não é determinante para a perenidade da cultura, sendo o plantio direto, uma alternativa a manutenção e/ou melhoria dos atributos do solo sem comprometer a rentabilidade da cultura (BARBOSA et al., 2019). Um desafio para a adoção do plantio direto em cana-de-açúcar no sudeste (principal região produtora) é o recente avanço da praga *Sphenophorus levis*, para seu controle é imprescindível a eliminação mecânica de soqueiras durante a reforma do canavial. Essa operação, adicionada as demais já mencionadas, aumenta ainda mais a desagregação do solo na camada de 0 – 0,15m na linha de plantio. Logo, novas alternativas devem ser avaliadas para o manejo conservacionista durante a reforma dos canaviais, aliado ao manejo dessa praga.

2.6. Utilização de modelagem para determinação da perda de solo por erosão hídrica

Um modelo é uma fórmula matemática que tem por objetivo facilitar o entendimento de algumas variáveis por meio da obtenção de vários parâmetros (BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, 2019). Em se tratando de perda de solo por erosão hídrica é comum a obtenção da taxa de perda de solo anual ou, também entender os fatores que interferem em cada uma das três fases do processo erosivo (desagregação, transporte e deposição) (FOSTER, 1980). Os modelos podem ser divididos em empíricos, que são modelos que estimam a perda de solo em nível de parcela (WISCHMEIER, W. H., & SMITH, 1978); de base matemática, que representam uma integração das leis físicas aos fenômenos do processo erosivo e estimam os parâmetros de entrada de acordo com equações matemáticas e fundamentais, que se baseiam os parâmetros de entrada em dados empíricos (BERTOL, I.;

DE MARIA, I. C.; SOUZA, 2019). Para cada região ou país é necessário um profundo estudo de qual modelo utilizar acordo com os dados de entrada possíveis de serem adquiridos e conhecimento da operacionalização do modelo.

Os modelos possibilitam informações e entendimento de diversos fenômenos naturais ligados ao processo erosivo, porém sua capacidade de prever com exatidão depende da quantidade de dados de entrada e complexidade do modelo, ou a sua capacidade de modelar todos os parâmetros que estão envolvidos no processo (FARIA, 2016) (Figura 2).

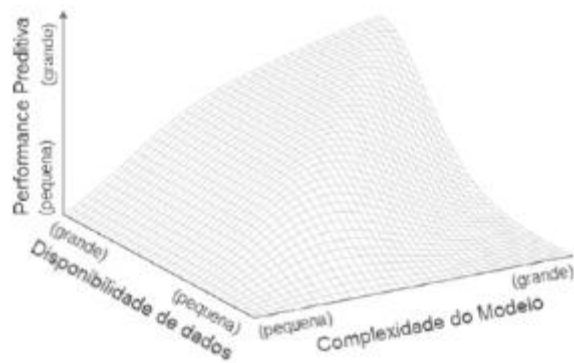


Figura 2. Relação entre a disponibilidade de dados e a complexidade do modelo na capacidade de prever os eventos (FARIA, 2016), adaptado de Grayson & Bloschl (2001).

É importante destacar que um modelo nunca será capaz de modelar totalmente todos os processos que interferem na ocorrência de erosão, visto que são várias variáveis que interferem no processo, por conta disso o pesquisador deve ter pleno conhecimento dos parâmetros de entrada e seu comportamento na bacia selecionada (FARIA, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local

3.1.1. Localização geográfica

A respectiva área possui histórico de 30 anos com o cultivo de cana-de-açúcar e o clima predominante é classificado como Aw segundo a classificação de Köppen, isto é, clima quente e úmido com chuvas concentradas no período do verão (FUNDAÇÃO ABC, 2021) (Figura 3).

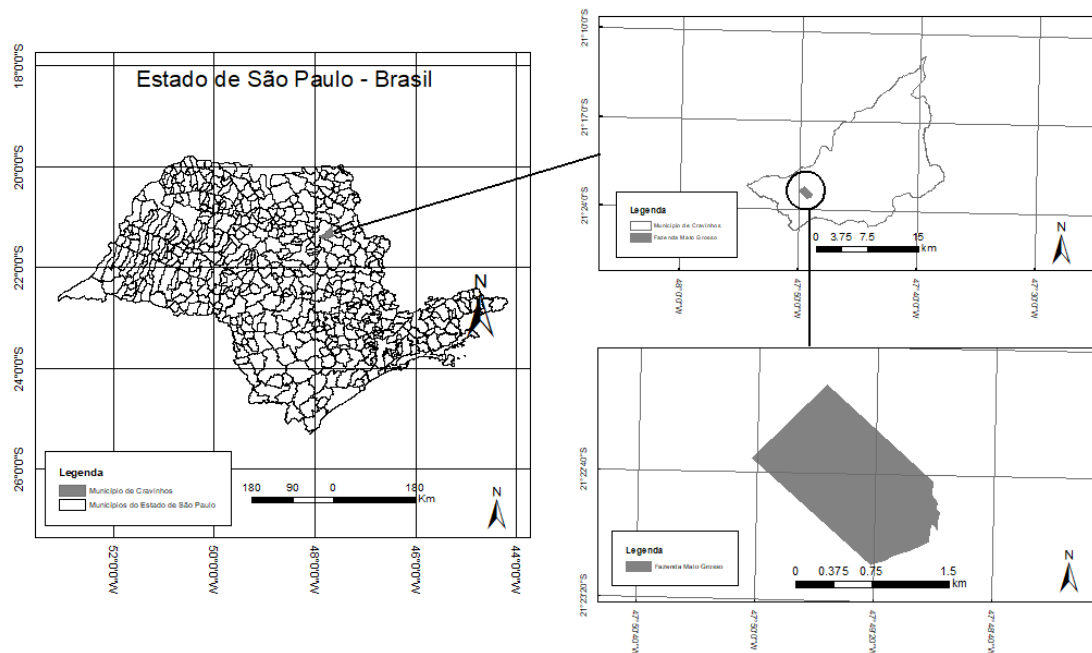


Figura 3. Representação esquemática da área de estudo, localizada no município brasileiro de Cravinhos, Estado de São Paulo.

3.1.2. Declividade

A escolha da área de estudo deveu-se a mesma apresentar cultivo sucessivo de cana-de-açúcar e também poucas variações no microrelevo, o que permitiu a instalação de parcelas com pouca variação de declividade (Figura 4).

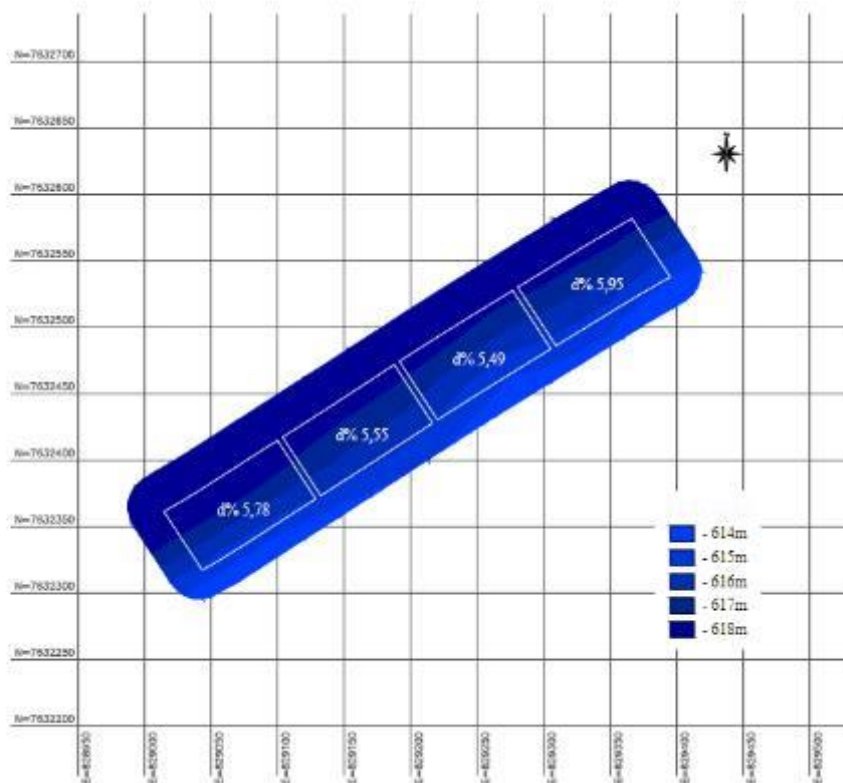


Figura 4. Modelo de elevação digital das parcelas do ensaio, com declividade média de cada um dos tratamentos (d%), isolinhas de altitude e coordenadas

3.1.3. Manejo da cultura

Foram realizadas 6 colheitas consecutivas anuais após a implantação do canavial e o preparo de solo utilizado para a implantação consistiu nas operações sequenciais de: eliminação mecânica de soqueira, gradagem, subsolagem e plantio, este ultimo, realizado de forma mecanizada com auxílio de plantadora PTX 7010.

Desde o plantio até a última colheita que antecedeu a instalação do experimento foi utilizada tecnologia de posicionamento global (GNSS) com correção RTK (*Real Time Kinematic*) mediante a utilização de torres previamente instaladas pela unidade produtiva e tecnologia embarcada nas máquinas. Logo, não houve trânsito na linha de plantio durante todo o ciclo da cultura.

A cultivar previamente utilizada no local foi a RB96 6928, colhida entre os meses de abril a julho ao longo do ciclo, por se tratar de cultivar de maturação precoce e com elevado potencial de desenvolvimento (ARCOVERDE et al., 2019). Durante o ciclo da cultura foi realizado o manejo convencional empregado pela unidade produtora que consistiu no manejo químico de plantas daninhas e pragas e aplicação de fertilizantes para a manutenção da fertilidade após cada colheita da cultura.

3.1.4. Caracterização do solo

Foi realizada amostragem de solo com auxílio de faca pedológica nas profundidades de 0 – 0,05; 0,05 – 0,1; 0,1 – 0,2; 0,2 – 0,4; 0,4 – 0,6; 0,6 – 0,8 e 0,8 – 1,0m. Para a realização da coleta, foram abertas 18 trincheiras ao longo da área de estudo com o objetivo de caracterização e identificação das condições químicas e físicas iniciais do solo após a sexta colheita consecutiva da cana de açúcar (Tabela 1). As análises químicas foram realizadas segundo metodologia proposta por (TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, 2017).

Tabela 1. Caracterização do LATOSSOLO VERMELHO acriférrico típico da área de estudo onde: **Prof.:** profundidade amostral (m); **M.O.** matéria orgânica do solo (g dm^{-3}); **pH:** potencial hidrogeniônico; **P:** fósforo extraível (mg dm^{-3}); **H + AL:** acidez potencia ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **K:** potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **Ca:** cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **Mg:** magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **Al:** alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **S:** soma de bases (K + Ca + Mg); **T:** capacidade de troca catiônica; **V:** saturação por bases (%).

Prof.	M.O	pH (H ₂ O)	pH (CaCl ₂)	P	H + AL	K	Ca	Mg	Al	S	T	V	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
0.05	30	5.80	5.29	22	3.2	0.11	3.12	1.13	0.00	4.36	7.57	57.53	62.60	21.64	15.76
0.15	26	5.75	4.88	16	4.1	0.08	1.70	0.68	0.00	2.46	6.51	37.73	64.60	20.00	15.40
0.30	20	5.81	4.90	15	3.6	0.06	1.15	0.36	0.00	1.57	5.14	30.54	65.10	19.28	15.62
0.50	16	5.93	5.21	10	2.8	0.02	0.95	0.28	0.00	1.25	4.02	30.98	64.40	20.78	14.82
0.70	15	5.82	5.28	7	2.4	0.00	0.80	0.19	0.00	0.99	3.44	28.82	64.50	20.07	15.43
0.90	14	5.58	5.40	7	2.4	0.00	0.60	0.18	0.00	0.78	3.20	24.38	66.30	18.71	14.99

3.2. Delineamento experimental e tratamentos avaliados

Foram utilizadas 4 parcelas experimentais com área de 480 m² e avaliados: I: Emprego da MEIOSI e II: tipo de preparo de solo (Figura 5). As áreas onde foi empregado o Método Interrotacional Ocorrendo Simultaneamente (MEIOSI) contaram com 12 m de espaçamento entre linhas e 0,7 m de espaçamento entre plantas.

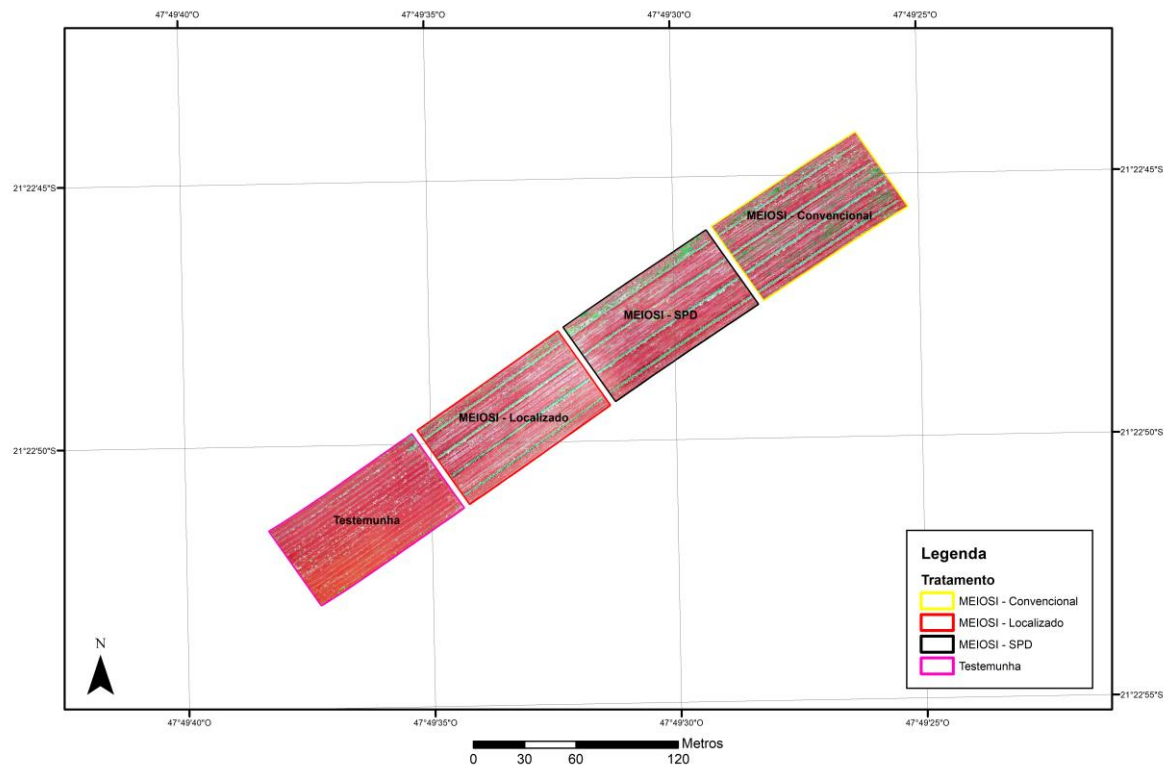


Figura 5. Distribuição das parcelas experimentais na área de estudo e coordenadas de referência no sistema UTM.

No tratamento testemunha foi realizado preparo convencional com as seguintes operações sequenciais: eliminação mecânica de soqueiras, grade aradora e subsolador. Nesse tratamento, a subsolagem foi realizada em 100% da área experimental. Não foi realizado o plantio de MEIOSI no local para avaliar separadamente nas demais parcelas o efeito isolado do emprego do sistema.

Foram empregados 3 parcelas com utilização do sistema MEIOSI sendo o espaçamento entre as linhas implantadas de 12 m e variáveis métodos de preparo de solo. O tratamento Localizado contou com as seguintes operações sequenciais: eliminação mecânica de soqueiras e subsolagem localizada (Figura 6). O tratamento convencional contou com as mesmas operações empregadas no tratamento testemunha, porém com o emprego do sistema MEIOSI.

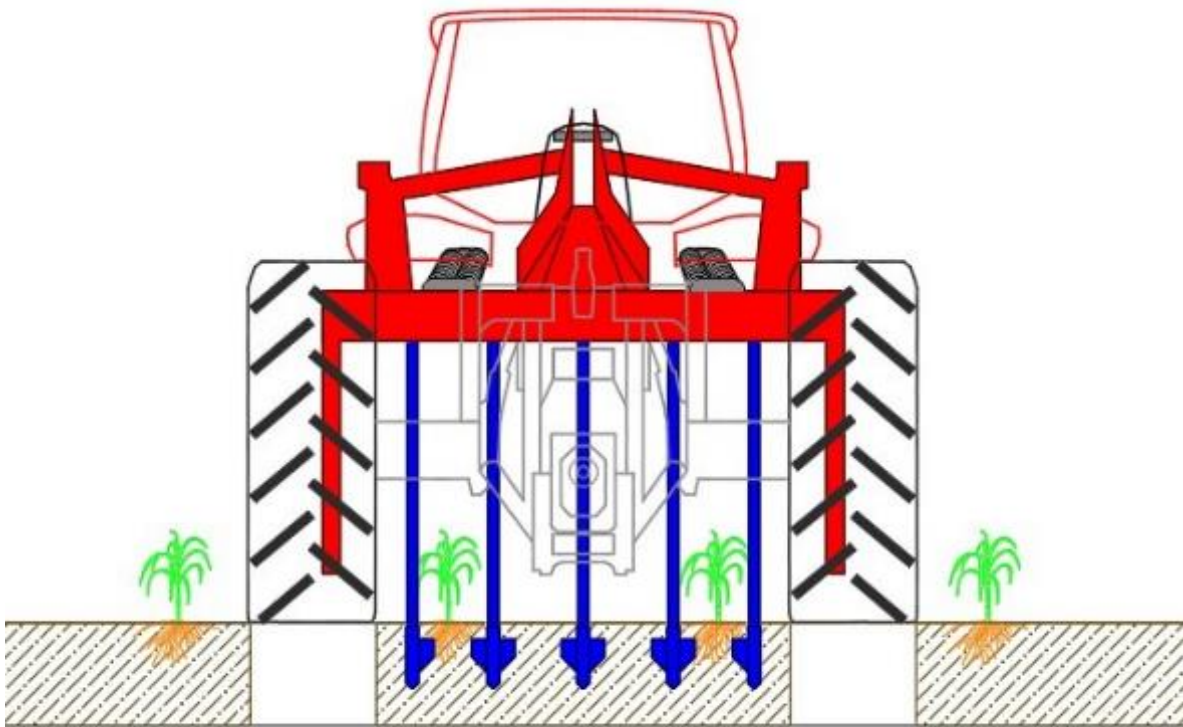


Figura 6. Esquema do subsolador canteirizado (que descompacta apenas as duas linhas de plantio e a entre-linha central) utilizado para o preparo de solo nos tratamentos Localizado e Convencional. O espaçamento entre as linhas de plantio é o convencional de 1,5 m.

Já no tratamento Reduzido foi realizada apenas a operação de eliminação mecânica de soqueira com o objetivo de entender o impacto das demais operações de preparo na perda de solo. A eliminação mecânica de soqueiras é uma operação realizada em áreas de reforma que visa controle de uma das principais pragas do setor (*Sphenophorus levis*). O implemento conta com 2 relhas que realizam a retirada dos rizomas da cana de açúcar (profundidade de 0,1 m). Os rizomas retirados do solo passam por um conjunto de facas rotativas que destacam os rizomas e os lançam para a superfície do solo (Figura 7).

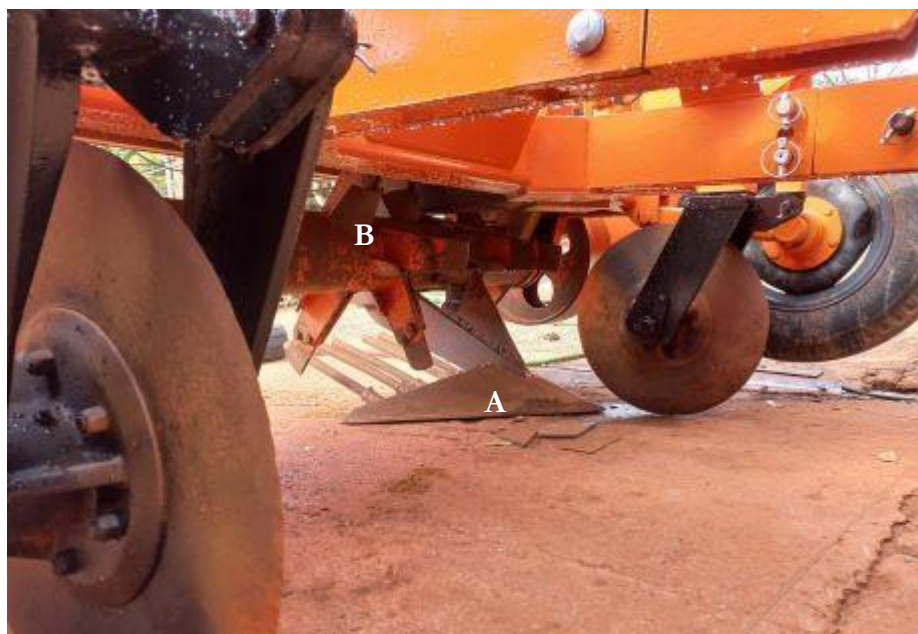


Figura 7. Eliminador mecânico de soqueiras utilizado no experimento. A: relha que retira os rizomas da cana-de-açúcar (prof: 0,1 m) e B: conjunto de facas rotativas que destroem os rizomas.

Para auxiliar na programação das atividades no momento da execução do ensaio, foi realizado o planejamento da execução das operações em cada parcela (Tabela 2). Em cada uma das áreas experimentais foram utilizados os implementos necessários acoplados a um trator do modelo CASE MAGNUM MX 260, de 260 cv de potência.

Tabela 2. Resumo das operações mecanizadas realizadas em cada uma das áreas experimentais.

Tratamento	Eliminação Mecânica de		
	Soqueiras	Grade Aradora	Subsolagem
Convencional	Sim	Sim	Sim
Localizado	Sim	Não	Sim
Reduzido	Sim	Não	Não

3.3. Softwares utilizados

Foi utilizado para processamento dos dados espaciais o ambiente de sistema de informações geográficas (SIG) ArcGIS 10.4 (ESRI, 2016). Para a modelagem da perda de solo, foi utilizado o modelo WEPP v2012.8 (FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007) e uma integração do modelo WEPP com o software ArcGIS 10.4 - GeoWEPP for ArcGIS (RENSCHLER, 2003). Também foi utilizado o Software DroneDeploy® (DJI, 2021), para fotointerpretação e criação do ortomosaico.

3.4. Entradas do modelo WEPP

3.4.1. Arquivos de relevo e criação do modelo de elevação digital do terreno (MED).

Os dados altimétricos do terreno foram levantados logo após a colheita do canavial, com o objetivo de minimizar uma possível interferência no levantamento pelo dossel das plantas. Para a obtenção dos dados altimétricos da área optou-se por um drone modelo Phantom 4 Pro V. 2.0, da marca DJI. Foi elaborado um plano de voo com auxílio do software DroneDeploy com altura de voo de 90 m e, durante o voo, retiradas fotos com sobreposição lateral e frontal de 70% para posterior processamento do ortomosaico (DJI, 2021) O referido drone possui sistema de posicionamento global (GPS) embarcado, porém para a obtenção de dados mais precisos foram instalados 11 pontos de controle físicos na área (Figura 8), sendo 9 localdos nos vértices da área de estudo (onde foi observada maior distorção das imagens aéreas) e 2 nos pontos centrais, os quais foram georreferenciados com auxílio de um receptor R6 da marca Trimble® nivelado com relação ao terreno, com tecnologia *Real Time Kinematic* (RTK) de correção embarcada, a partir da qual autores encontraram valores de precisão de 0,1 m para cotas altimétricas, sendo essas levantadas a partir de veículo em movimento e para finalidade de pavimentação asfáltica (PEYRET et al., 2000).



Figura 8. Equipamento R6, da marca Trimble®, que realiza o georreferenciamento com correção *Real Time Kinematic* (RTK), utilizado para a validação dos pontos de controle da área em estudo.

A partir dos dados levantados em campo com o drone, as imagens foram processadas juntamente com os pontos de controle no software DroneDeploy ® de onde foi extraído um arquivo *raster* (imagem da área de estudo) contendo as informações de altitude. O arquivo *raster*, então, foi convertido em nuvem de pontos por meio da função *raster to point* no software ArcGIS® v. 10.4. Ainda no ArcGIS®, foi realizada a interpolação dos dados altimétricos através da função *tin* (Triangulated Irregular Network), que resultou em um arquivo *tin* com o modelo de elevação digital do terreno (MED) (Figura 4) (Apêndice A). Para que fosse possível a utilização do MDE no WEPP, foram realizadas algumas conversões com auxílio do software ArcGIS®: o arquivo *tin* foi convertido em *raster* com utilização da função *tin to raster* e posteriormente, convertido em *ascii*, por meio da função *raster to ascii* (MINKOWSKI & RENSCHLER, 2008).

Para a elaboração do MDE, é necessária a configuração da densidade de pontos a serem utilizados na interpolação. Durante os testes de resposta do modelo, foram estudados pontos equidistantes em 0,125; 1; 3; 7; 10 e

30 m, sendo que a densidade de pontos de 10 x 10 m foi a que proporcionou a melhor resolução e resposta do modelo para as condições estudadas (MINKOWSKI & RENSCHLER, 2008).

3.4.2. Arquivos de solo

Todos os dados necessários para a criação do arquivo de solo foram analisados mediante coleta e caracterização do solo presente no experimento. Para a criação do arquivo foi utilizado o próprio modelo WEPP[®]. Na interface de configuração do solo foram inseridas as informações e elaborado o arquivo *.sol* (tabela 3).

Tabela 3. Informações inseridas no modelo WEPP[®] para criação do arquivo de solo.

Layer	Profundidade (mm)	Areia (%)	Argila (%)	Matéria Organica (%)	CTC (meq 100g ⁻¹)	Rocha (%)
1	50	15,8	62,6	3,0	7,6	0,0
2	150	15,4	64,6	2,6	6,5	0,0
3	300	15,6	65,1	2,0	5,1	0,0
4	500	14,8	64,4	1,6	4,0	0,0
5	700	15,4	64,5	1,5	3,4	0,0
6	900	15,0	66,3	1,4	3,2	0,0

Foi realizada uma que mais se adequassem a realidade do trabalho. Para tal, foi realizado o cálculo do fator de correção para erodibilidade de acordo com a cobertura vegetal (CK_{iCS}) de acordo com a equação proposta por GOMES (2019) (eq. 1).

$$CK_{iCS} = e^{3,430 CS} \quad (eq. 1)$$

Em que: CK_{iCS} é o fator de correção para erodibilidade do solo de acordo com a cobertura e CS é a razão da cobertura vegetal ($0 - 1$); e é a base do logaritmo natural.

Os valores foram calculados e os parâmetros de entrada foram diferidos para cada um dos tratamentos empregados de acordo com acervo pessoal do Professor Marcilio Vieira Martins Filho, embasados em (LUCAS JUNIOR & MARTINS FILHO, 2009; SOUSA, 2011) (tabela 4).

Para verificar a sensibilidade do modelo e a possibilidade de utilizar metodologias mais simples para determinação da infiltração de água no solo, foram utilizados os dados de infiltração (k_s) obtidos durante a chuva simulada e com a metodologia BEST.

Tabela 4. Parâmetros de erodibilidade em sulcos (K_i), erodibilidade entressulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica do solo (τ_c), infiltração do solo (K_c), CS é a razão de cobertura vegetal, CK_{iCS} é o calculo conforme eq. 1, e fonte de pesquisa. ⁽¹⁾Juntamente com arquivo pessoal do prof. Marcilio Vieira Martins Filho. ² valor de infiltração calculado durante a chuva simulada. ³ valor de infiltração obtido pela metodologia BEST (LASSABATÈRE et al., 2006);

Parâmetro	Tratamento	CS	CK_{iCS}	Valor	Unidade	Fonte
K_i	Convencional	0	1,0	13,4	$\times 10^6$ (kg s m ⁻⁴)	(GOMES, 2019) ⁽¹⁾
	Localizado	0,4	0,25	3,39		
	Reduzido	0,3	0,36	4,78		
K_r	Convencional	0	1,0	0,00601	$\times 10^{-3}$ (s m ⁻¹)	(GOMES, 2019) ⁽¹⁾
	Localizado	0,4	0,25	0,00555		
	Reduzido	0,3	0,36	0,00578		
τ_c	Convencional	0	1,0	3,420	N m ⁻²	(GOMES, 2019) ⁽¹⁾
	Localizado	0,4	0,25	4,765		
	Reduzido	0,3	0,36	3,326		
K_c	Todos	-	-	47 ²	mm h ⁻¹	Autor
				470 ³		

Foi utilizada saturação inicial do solo no valor de 40%, devido à mesma apresentar melhor calibração para as condições testadas. O referido solo não apresenta camada restritiva à drenagem, logo foram levantados todos os dados necessários para a criação do arquivo de solo.

3.4.3. Arquivos de manejo e cultura

Foi utilizada a plataforma de criação de manejos do modelo WEPP® para simulação dos manejos empregados nos tratamentos. Parâmetros de manejo foram imputados de acordo com dados encontrados na literatura e modelados a partir do próprio WEPP® (FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007) (tabela 5).

Tabela 5. Parâmetros de cultura (cana de açúcar) utilizados para modelagem da perda de solo.

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Parâmetros de crescimento e colheita da planta			
Taxa de conversão de biomassa	35	kg MG ⁻¹	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Graus-dia para a brotação	60	Graus-dia	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Graus-dia para o pleno desenvolvimento	4500	Graus-dia	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Espaçamento entre plantas	70	cm	Autor
Diâmetro do caule pré colheita	7	cm	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Altura da colheita	5	cm	Autor
Índice de Colheita	70	%	Autor
Parâmetros de Temperatura e Radiação			
Temperatura Basal	10	°C	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Temperatura ótima para o desenvolvimento	27,5	°C	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Temperatura máxima	35	°C	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Temperatura de congelamento	0	°C	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Coefficiente de extinção da radiação	0,6	-	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Parâmetros de parte aérea e raiz			
Coefficiente de cobertura vegetal	2,5	-	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Parâmetro para o valor da altura da cultura (equação WEPP®)	2,5	-	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Altura máxima da cultura	250	cm	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Índice de área foliar máximo	8	-	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Profundidade máxima do sistema radicular	150	cm	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Razão crescimento radicular/crescimento abaixo do nível do solo	25	%	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Massa de raiz máxima para cultura perene	10	kg m ⁻²	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)

Parâmetros de Maturação			
Percentual da estação de crescimento onde há decrescimento do índice de área foliar	90	%	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Período em que há maturação	365	dias	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Percentual de cobertura após a colheita	80	%	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Percentual de biomassa remanescente após a colheita	30	%	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Parâmetros do resíduo			
Parâmetro para a equação de resíduo	7,2	m ² kg ⁻¹	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Ajuste para permanência de resíduo	50	%	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Constante de decomposição do resíduo (acima do solo)	0,004	-	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Constante de decomposição do resíduo (abaixo do solo)	0,004	-	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Tipo de cultura	Não Frágil	-	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Outros parâmetros			
Tolerância a seca específica	0	%	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Biomassa crítica abaixo da zona de congelamento	0	kg m ⁻²	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Fator de fricção de Darcy Weisbach para a planta viva	0	-	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Unidade de colheita	0	-	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Produtividade ótima sem estresses	0	kg m ⁻²	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)

Vale salientar que poucos são os dados medidos encontrados na literatura para compor os parâmetros exigidos pelo WEPP®. Logo, optou-se por imputar alguns dados do próprio modelo utilizando um arquivo de cana-de-açúcar pré-existente. Já os dados das operações realizadas foram imputados de acordo com as recomendações técnicas evidenciadas em campo e utilizadas pelo setor. Para cada um dos tratamentos foram inseridas as operações correspondentes. Os parâmetros comuns a todos os tratamentos são apresentados na tabela 6. Já a descrição das demais operações e parâmetros utilizados estão elencados no Apêndice B.

Tabela 6. Parâmetros de operações simuladas em todos os tratamentos empregados no experimento.

Tipo de Operação	Operação*	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
		Planta	Tabela 4	-	-
		Densidade do solo após preparo	1,1	g cm ⁻³	Autor
		Parte aérea inicial	0	%	Autor
		Dias desde a última operação de preparo	100	dias	Autor
		Dias desde a última colheita	10	dias	Autor
		Camada congelada	0	cm	Autor
		Cobertura da entrelinha inicial	100	%	Autor
		Manejo da cultura inicial	Perene	-	Autor
		Chuva acumulada desde a última operação de preparo	0	mm	Autor
		Altura da entrelinha depois da última operação de preparo	2	cm	Autor
		Cobertura da linha inicial	100	%	Autor
		Rugosidade inicial após a operação de preparo do solo	2	cm	Autor
		Espaçamento entrelinha	150	cm	Autor
Condições Iniciais	Após colheita de cana de açúcar	Tipo do rodado	Permanent e	-	Autor
		Profundidade inicial de neve	0	cm	Autor
		Profundidade inicial de descongelamento	0	cm	Autor
		Profundidade de operações secundárias de preparo	10	cm	Autor
		Profundidade de operações primárias de preparo	20	cm	Autor
		Espaçamento inicial na linha	2,54	cm	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
		Total de raízes mortas	0,02	kg m ⁻²	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
		Total de resíduos na superfície	0,13	kg m ⁻²	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
		Total de resíduos incorporados no solo na entrelinha para culturas não frágeis	0	%	Autor
		Preparo do solo	Eliminação de Soqueira	Total de resíduos incorporados no solo na entrelinha para cultura frágeis	0
Número de linhas do implemento	2			-	Autor

Tipo de implemento	Preparo do solo	-	Autor
Posição de engate	Traseira	-	Autor
Altura do cume após a operação de preparo	0	cm	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
Intervalo dos cumes	150	cm	Autor
Percentual dos resíduos incorporados na linha	100	%	Autor
Percentual dos resíduos incorporados na linha para culturas não frágeis	100	%	Autor
Rugosidade do solo após a operação	8	cm	Autor
Total de área preparada	80	%	Autor
Média de profundidade do preparo	10	cm	Autor

* nomenclatura atribuída pelo autor

3.4.4. Arquivos de clima (“Single Storm”)

Para simulação da perda de solo em cada uma das parcelas experimentais foi utilizada a função do WEPP® que simula um único evento chuvoso (“Single Storm”) (APÊNDICE C). A latitude e longitude foram extraídas do mapeamento realizado para elaboração da declividade média, sendo: Lat: -21,22°; Long: -47,40° e altitude: 616 m. Para determinação dos dados de clima foram extraídos dados de normais climatológicas (série de 10 anos) a partir de estação meteorológica automática instalada em ponto próximo à área experimental (Tabela 7). A ferramenta Cligen, contida no próprio modelo WEPP foi utilizada para a geração dos arquivos.

Tabela 7. Parâmetros de clima utilizados para a simulação de chuvas no software WEPP®. Série de 10 anos obtidos a partir de estação automática próximo à área de estudo. Onde: T_{max} : média das temperaturas máximas mensais observadas (°C); T_{min} : média das temperaturas mínimas mensais observadas (°C); Ω : média da radiação solar mensal ($W m^{-2}$) e P: precipitação média mensal (mm).

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T_{max} (°C)	32,8	33,1	32,0	31,4	28,9	28,4	29,2	30,6	33,4	33,9	33,6	32,8
T_{min} (°C)	21,0	21,0	20,5	18,5	15,5	14,6	13,8	14,5	17,3	19,3	19,6	21,0
Ω ($W m^{-2}$)	279,4	284,7	251,3	236,3	192,4	170,2	174,5	188,9	189,8	224,1	269,6	273,3
P (mm)	232,7	151,7	126,9	57,4	43,9	34,5	14,2	12,2	50,5	91,5	153,1	187,8

Foi simulado um único evento chuvoso (denominado de “Single Storm” no WEPP®) na data simulada de 2/1/1 que se refere ao mês em que foi realizada a chuva simulada.

3.5. Coeficiente de infiltração do solo saturado (k_s)

Com o objetivo de identificar o impacto dos tratamentos no coeficiente de infiltração do solo, foram realizados testes de infiltração antes (T0) e após a instalação das parcelas experimentais (T1). A metodologia Beerkan (BEST) foi utilizada para determinação da infiltração do solo (LASSABATÈRE et al., 2006). A referida metodologia consiste na utilização de um anel de 0,16 m cravado no solo a uma profundidade de aproximadamente 0,01 m. Após a inserção dos anéis foi depositado em seu interior a quantidade de 0,15 l de água e medidos os tempos para a total infiltração de todo o líquido. O processo se repetiu até que o tempo para a infiltração se tornasse constante em no mínimo três repetições sequenciais, o que ocorreu entre a 12ª e 15ª deposição de água no interior do anel.

Para os cálculos de infiltração, leva-se em conta o tempo para a total infiltração da água inserida no anel e o volume inserido, além de constantes relacionadas às forças exercidas sobre o líquido e aspectos do solo como umidade e textura. Foi utilizada a metodologia proposta por Bagarello et al. (2012), que consiste na simplificação de alguns coeficientes necessários para a realização dos cálculos (FRANSOZI, 2020).

Alem da metodologia BEST foi realizado o cálculo da infiltração com utilização do simulador de chuvas tipo Swanson (SWANSON, 1965). O cálculo foi realizado mediante a obtenção da vazão de enxurrada, precipitação empregada no simulador e área da parcela (eq. 2).

$$K_s = I60 - \frac{Q}{A} \quad (eq. 2)$$

Onde K_s é o coeficiente de infiltração (mm h^{-1}); $I60$ é a intensidade da chuva empregada pelo simulador (mm h^{-1}); Q é a vazão de enxurrada (l h^{-1}) e A é a área da parcela experimental (m^2).

3.6. Densidade do solo

A densidade do solo inicial (T0) e após a instalação das parcelas experimentais (T1) foi realizada nas profundidades (0,05; 0,15; 0,3 e 0,5) com auxílio de anel volumétrico conforme metodologia descrita por (TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, 2017). Foram coletadas amostras nas posições Centro da Linha, Entre-Linha e Centro do Canteiro (Figura 9).

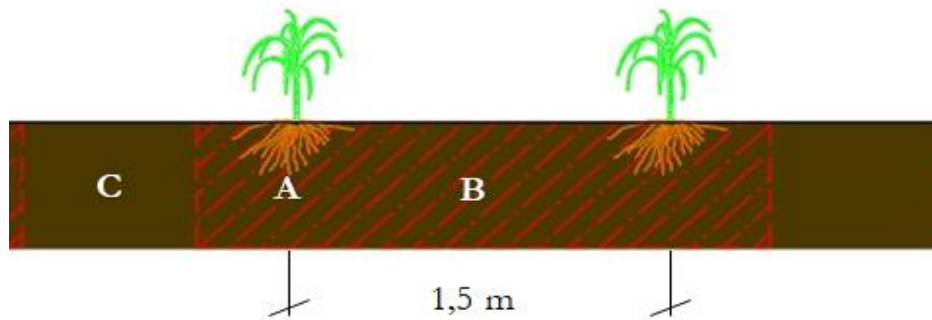


Figura 9. Localização das coletas de densidade; A: linha; B: centro do canteiro; C:entre-linha. Sendo C a zona de tráfego de máquinas.

Para tal coleta foram abertas 3 trincheiras em cada uma das parcelas experimentais com auxílio de anel volumétrico com 0,05m de diâmetro e 0,025m de altura. As amostras foram secas em estufa a 105°C durante 24 horas e posteriormente pesadas em balança analítica para determinação da densidade do solo em cada uma das camadas analisadas. A densidade do solo foi determinada mediante a divisão entre o peso de solo seco e o volume do anel utilizado (eq. 3).

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_a} \quad (eq. 3)$$

Onde D_s é a densidade do solo, expressa em $g\ cm^{-3}$; M_{ss} é a massa de solo seco empesa (g), após secagem durante 24 horas em estufa a 105°C; e V_a é o volume do anel utilizado para as coletas (cm^{-3}).

3.7. Calibração e simulações com o simulador de chuvas tipo Swanson (1965)

O simulador de chuvas utilizado para os ensaios foi um simulador do tipo Swanson (SWANSON, 1965). Foi montado um conjunto reservatório de água – motor estacionário – simulador (Figura 10).

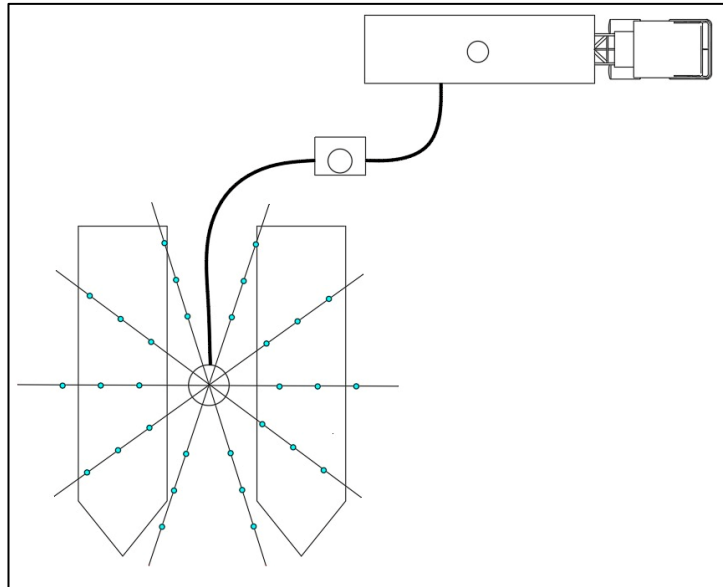


Figura 10. Representação esquemática do conjunto simulador-Motor estacionário e reservatório de água.

Para calibração do simulador foram realizadas 2 chuvas com duração de 15 minutos, sendo que em uma delas utilizou-se 30 bicos de aspersão abertos ($i30$) e, na outra, 15 bicos de aspersão abertos ($i15$). Também foi posicionado um manômetro na extremidade de um dos braços do simulador visto que a vazão do bico de aspersão Veejet 80-100® utilizado varia de acordo com a pressão do líquido exercida. A intensidade da chuva foi calculada mediante o posicionamento de 12 pluviômetros no sentido radial da ação do simulador (Figura 11).

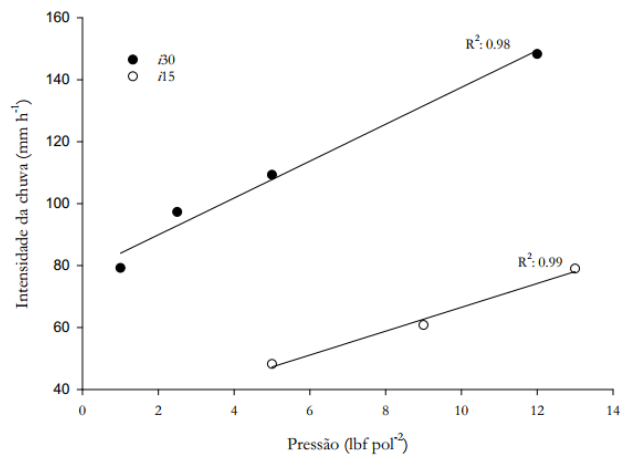


Figura 11. Calibração do simulador de chuva com 30 ($i30$) e 15 ($i15$) bicos abertos.

Optou-se para utilização de chuva com intensidade de 60 mm h^{-1} devido à presença na literatura de alguns trabalhos mencionando essa intensidade e superior ao coeficiente de infiltração do solo escolhido para a instalação do ensaio (MARTINS FILHO et al., 2009). Logo, a pressão de trabalho durante o experimento foi de $9,0 \text{ lbf pol}^{-2}$.

Foram realizadas 4 chuvas simuladas no tratamento Testemunha para validação dos parâmetros de entrada do modelo WEPP® e posteriormente utilizados os parâmetros levantados para modelagem da perda de solo nos demais tratamentos.

Para a coleta da enxurrada foi utilizada metodologia proposta por MARTINS FILHO et al. (2009) que consiste na utilização potes plásticos com volume de 1,5 l. Foram realizadas 12 coletas em cada parcela, sendo uma logo no início do escoamento superficial e as demais a cada 5 minutos transcorridos após a primeira coleta. A seguir foi utilizado papel filtro, previamente pesado, para separação do sedimento contido nos potes. Os filtros contendo o solo foram secos em estufa de circulação forçada durante 48 horas à temperatura de 65°C. A erosão foi determinada de acordo com a massa de terra presente no filtro e o tempo de coleta de cada um dos potes (eq. 4). Para realização dos cálculos foi utilizado o software Excel®.

$$A = \frac{[P(f + s)s - Pf]}{S \times T} \quad (eq. 4)$$

Onde A é a erosão em kg m⁻² s⁻¹; P(f+s) é o peso do filtro e sedimento seco em kg; Pf é o peso do filtro seco em kg; S é a área da parcela em m²; e T é o tempo de coleta.

De posse dos tempos de coleta e pesagem dos potes utilizados foi elaborada a curva de infiltração do solo mediante a chuva artificial. O calculo empregado levou em conta a quantidade de enxurrada e o tempo necessário para a coleta, além da área da parcela e a intensidade da chuva artificial (eq. 5).

$$I = 60 - \frac{E}{A} \quad (eq. 5)$$

Onde I é a infiltração de água no solo em mm h⁻¹; 60 é a intensidade da chuva simulada em mm h⁻¹; E é a enxurrada em l h⁻¹ e A é a área da parcela em m².

Foi utilizado o software Excel® para a realização dos cálculos de infiltração e o software SigmaPlot® para a elaboração dos gráficos e melhor entendimento do comportamento da infiltração ao longo do tempo. Os dados calculados no experimento em campo foram comparados com os medidos com os anéis utilizando a metodologia BEST (LASSABATÈRE et al., 2006).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Densidade do solo

Devido às diferentes operações realizadas nos tratamentos observa-se redução da densidade do solo nos tratamentos Convencional e Localizado para a localização centro do canteiro (Figura 12). Em ambos os tratamentos foi realizada a operação de subsolagem de forma localizada, cujo objetivo é a redução da densidade do solo para o posterior plantio de cana-de-açúcar. Essa redução de densidade observada nos dois tratamentos em relação ao tratamento REDUZIDO deve-se possivelmente ao aumento da porosidade do solo no local, que impacta a densidade do solo (CORSINI & FERRAUDO, 1999).

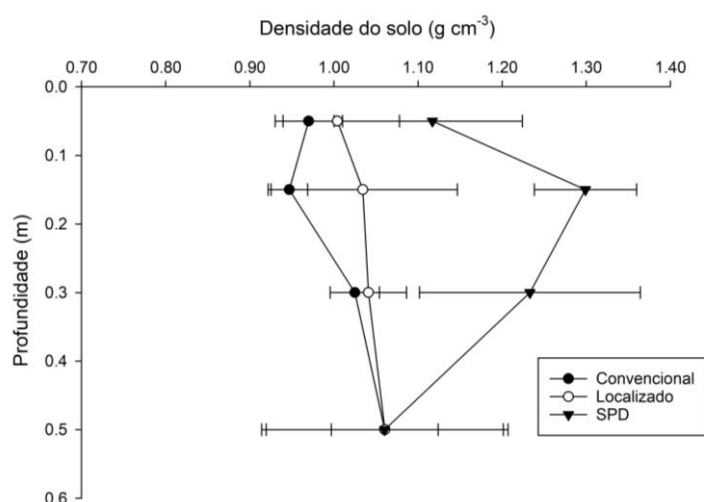


Figura 12. Densidade do solo no centro do canteiro após a instalação dos tratamentos. As linhas horizontais representam o desvio padrão amostral.

A redução da densidade do solo evidenciada no centro do canteiro possibilita um maior volume de exploração radicular devido à redução de camadas restritivas para o seu desenvolvimento. Para o referido solo e classe textural os limites para o desenvolvimento radicular estão entre 1,3 a 1,33 g cm⁻³ (ARGENTON et al., 2005; KLEIN, 2006).

Para o tratamento Reduzido na camada 0 – 0,1 m observa-se densidade do solo inferior à camada 0,1 - 0,2 m. Esse fato deve-se ao maior teor de matéria orgânica evidenciado na camada superficial. Segundo KRZIC et al. (2003) para cada 1% de matéria orgânica acrescido no solo há diminuição de até 11% no valor da densidade, logo a redução evidenciada no trabalho pode ser atribuída ao maior teor de matéria orgânica nas camadas superficiais. Nos demais tratamentos não se observa mudança na densidade do solo até a camada analisada (0,5 m), devido principalmente a execução da operação de subsolagem (0,4 m) e à amostragem ter sido realizada no centro do canteiro, local este em que uma das hastes do implemento subsolador executa a operação.

Além da redução da densidade na posição centro do canteiro, observa-se redução da densidade na entre-linha de plantio após o emprego dos tratamentos. Antes da instalação dos tratamentos a densidade na entre-linha nas camadas superficiais era ao redor de 1,35 g cm⁻³ valor esse que impossibilita o desenvolvimento radicular (ARGENTON et al., 2005; KLEIN, 2006). A densidade do solo em sistema de plantio direto tende a ser maior

quando comparado ao sistema de preparo convencional até a camada 0,15 m (CORRECHEL, 1998) esse efeito foi observado, porém sem diferença em relação aos desvios padrão dos outros tratamentos (Figura 13).

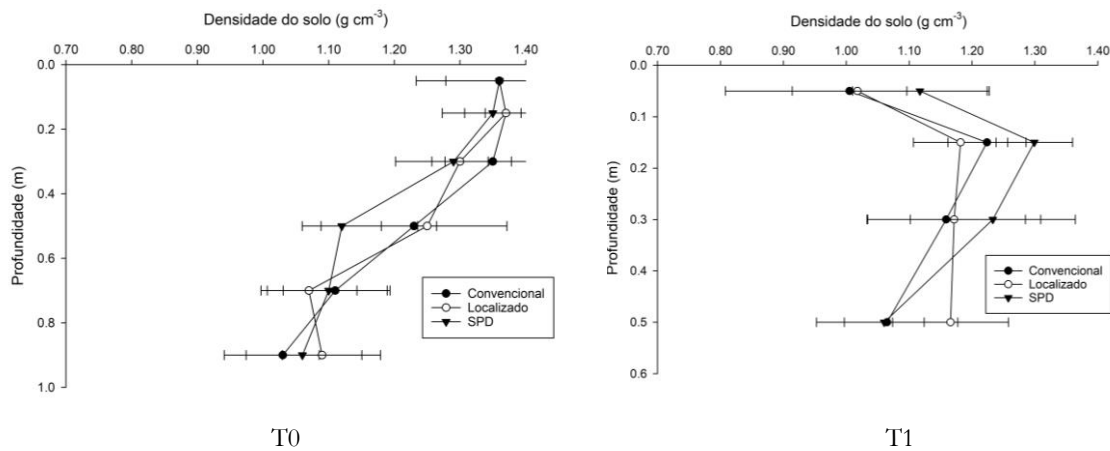


Figura 13. Densidade do solo na entre-linha de plantio antes (T0) e após a instalação dos tratamentos (T1). As linhas horizontais representam o desvio padrão amostral.

A redução de densidade na entre-linha após a realização das operações foi algo observado, mas que não era esperado nos tratamentos Localizado e Reduzido por não ter ocorrido operação no local. Tal redução era esperada para o tratamento Convencional devido ao emprego de gradagem para o preparo. Uma hipótese é que a redução deve-se à própria operação de subsolagem (para os tratamentos localizado e convencional) em que a haste passa a uma distância de 0,35 m do centro da entre-linha. A realização da operação teria ocasionado perturbação no solo devido à proximidade e reduzido a densidade do solo. Segundo CASSIANO (2005) a haste causa perturbação no solo até uma distância de 0,45 m, sendo a que a profundidade da zona de ação é menor na medida em que se distancia do centro da haste (Figura 14). Logo, corrobora com a hipótese mencionada.

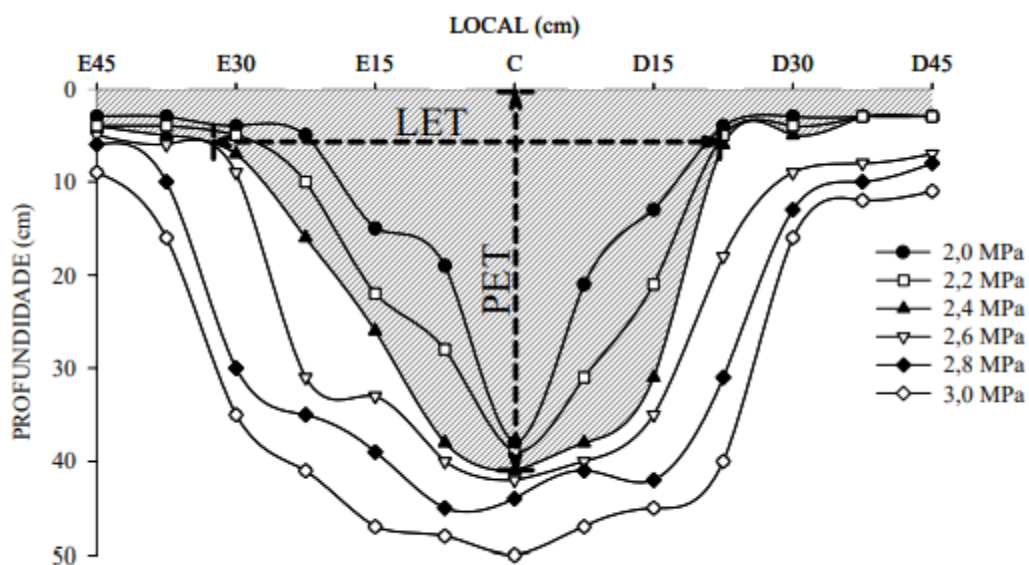


Figura 14. Zona de perturbação do solo (cinza) pela passagem da haste do subsolador a uma profundidade de 0,4 m. Fonte: CASSIANO (2005).

Com relação à linha de plantio se observou o comportamento esperado de manutenção ou leve redução da densidade do solo (Figura 15). Em todos os tratamentos praticamente não ocorreu variação da densidade do solo no local devido ao maior teor de matéria orgânica em decomposição durante o preparo evidenciado e pela maior presença de raízes e rizomas nas camadas superficiais do solo que aumentam a porosidade e, conseqüentemente, reduz a densidade do solo (STONE & SILVEIRA, 2001).

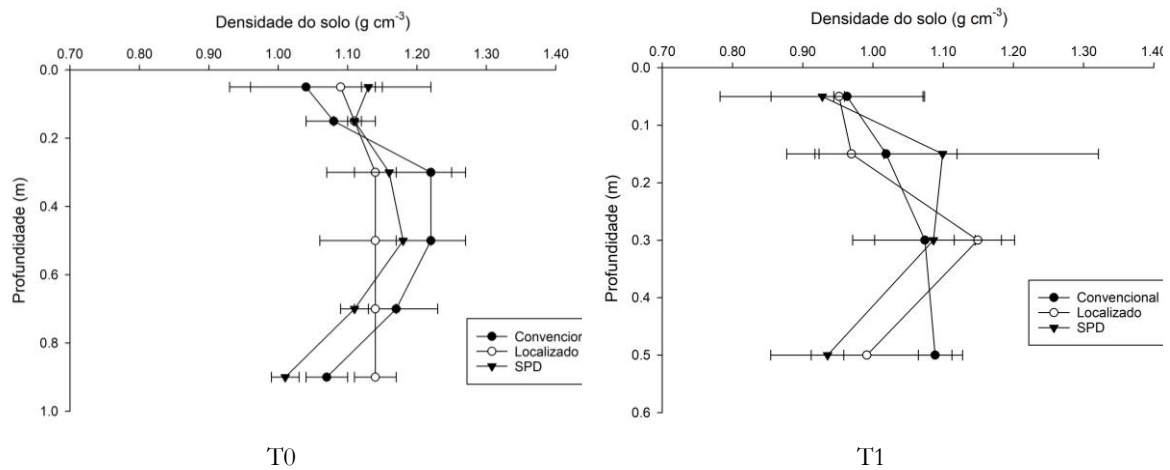


Figura 15. Densidade do solo na linha de plantio antes (T0) e após a instalação dos tratamentos (T1).

4.2. Coeficiente de infiltração (K_s)

O coeficiente de infiltração ou (K_s) é um dos fatores de maior impacto na ocorrência de processos erosivos juntamente com a cobertura vegetal (PERTUSSATTI et al., 2011). Foram observados coeficientes de infiltração muito elevados quando realizado o teste com anéis volumétricos e calculado de acordo com a metodologia BEST (LASSABATÈRE et al., 2006) (Tabela 8). A metodologia BEST leva em conta alguns parâmetros pré-estabelecidos para calcular a infiltração de água no solo. Vários são os fatores que influenciam no valor de infiltração e um dos principais é a altura em que a água é depositada no anel volumétrico (DI PRIMA et al., 2017). No referido estudo a altura padrão de deposição de água no anel foi de cerca de 0,15 m e segundo DI PRIMA et al. (2017) deve ser utilizada maiores alturas para aumentar a confiabilidade do teste. Porém, como foi realizado o teste em todos os tratamentos com a mesma altura foi possível fazer a análise comparativa entre eles, com a ressalva de os valores calculados terem superestimado o K_s levantado durante a simulação.

Tabela 8. Coeficiente de infiltração (mm h^{-1}) medido de acordo com a metodologia BEST (LASSABATÈRE et al., 2006).

Tratamento	T0 - Início		T1		
	Linha (mm h^{-1})	Entre-Linha (mm h^{-1})	Linha (mm h^{-1})	Entre-Linha (mm h^{-1})	Centro do Canteiro (mm h^{-1})
Convencional	853.35 ± 536.5	29.45 ± 13.8	359.67 ± 73.4	121.67 ± 22.0	482.39 ± 121.2
Localizado	761.04 ± 422.4	46.64 ± 39.6	363.42 ± 88.3	164.12 ± 46.3	743.64 ± 239.0
Reduzido	804.6 ± 565.0	32.45 ± 28.2	201.23 ± 107.3	60.48 ± 23.1	-

O coeficiente de infiltração de água no solo possui comportamento parecido com as informações de densidade supracitadas. A atenuação da densidade do solo em T1 na entre-linha quando comparado ao T0 proporcionou também maior infiltração de água no solo (Tabela 7). No local linha se observa redução da infiltração quando comparado T0 a T1 em todos os tratamentos. Essa diferença deve-se possivelmente ao efeito do selamento superficial proporcionado pela chuva natural que ocorreu sobre a área de estudo (as avaliações de infiltração foram realizadas dois meses após as operações de preparo de solo). Apesar das diferenças entre as operações realizadas entre os tratamentos cada uma delas causa desestruturação do solo (em diferentes intensidades) e, posteriormente, possibilita condições mais propícias ao selamento superficial à medida que chuvas sucessivas incidem sobre o solo recém-preparado. (PAULA, 2015; REICHERT & CABEDA, 1992; SCHAEFER et al., 2002). O local centro do canteiro foi o que apresentou maiores coeficientes de infiltração entre os locais avaliados em T1. Por se tratar de um local onde antes era estabelecida a zona de tráfego dos equipamentos é possível observar a redução de densidade no local, indicativo de que houve aumento da porosidade total e, conseqüentemente, aumento do coeficiente de infiltração (Figura 12).

A infiltração de água no solo possui elevada variabilidade, seja ela espacial ou temporal, mesmo em um mesmo solo (NETO et al., 2021). Além da elevada variabilidade também é influenciada por diversos parâmetros químicos, físicos e biológicos do solo (CARVALHO et al., 2022). No intuito de estabelecer uma relação entre o coeficiente de infiltração e a densidade do solo foi estabelecida uma relação entre os dois parâmetros físico-hídricos do solo (Figura 16).

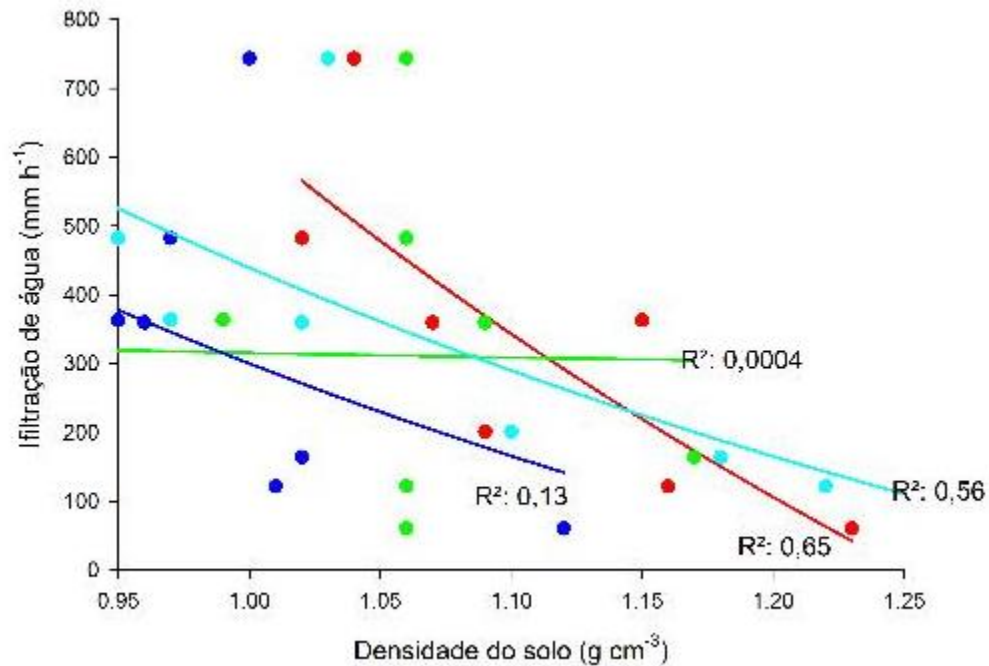


Figura 16. Relação infiltração x Densidade do nas profundidades 0 - 0,6 m. Onde: Azul escuro: 0 – 0,1; Azul claro: 0,1 – 0,2 m; Vermelho: 0,2 – 0,4; Verde: 0,4 – 0,6 m;

Foi observado baixo valor de R^2 na relação entre o coeficiente de infiltração e a densidade do solo, isso mostra que outros parâmetros além da densidade influenciam na infiltração de água no solo para praticamente todas as profundidades, como já era esperado. Porém, observa-se maior correlação entre as camadas de subsuperfície 0,1 – 0,2 m (R^2 de 0,56) e 0,2 – 0,4 m (R^2 de 0,65). A baixa correlação entre infiltração e densidade nas camadas superficiais deve-se a heterogeneidade de matéria orgânica na superfície, além de outros fatores como porosidade, textura e atividade microbológica (CARVALHO et al., 2022). Nas maiores profundidades, praticamente não há correlação entre densidade e infiltração uma vez que a 0,5 m o solo possui maior heterogeneidade física, química e biológica.

Os valores de infiltração de água no solo com utilização do simulador de chuvas tipo Swanson diferem dos obtidos com a metodologia BEST (Figura 17). Fato este que se deve possivelmente ao selamento superficial do solo e também a outros fenômenos físico-hídricos que ocorrem no solo a exemplo da retenção e movimentos laterais (POTT & DE MARIA, 2003; REICHERT & CABEDA, 1992; SCHAEFER et al., 2002). Valores semelhantes aos levantados no presente trabalho também foram evidenciados por BARCELOS et al. (1999) utilizando chuva simulada em solo de igual textura e Ordem.

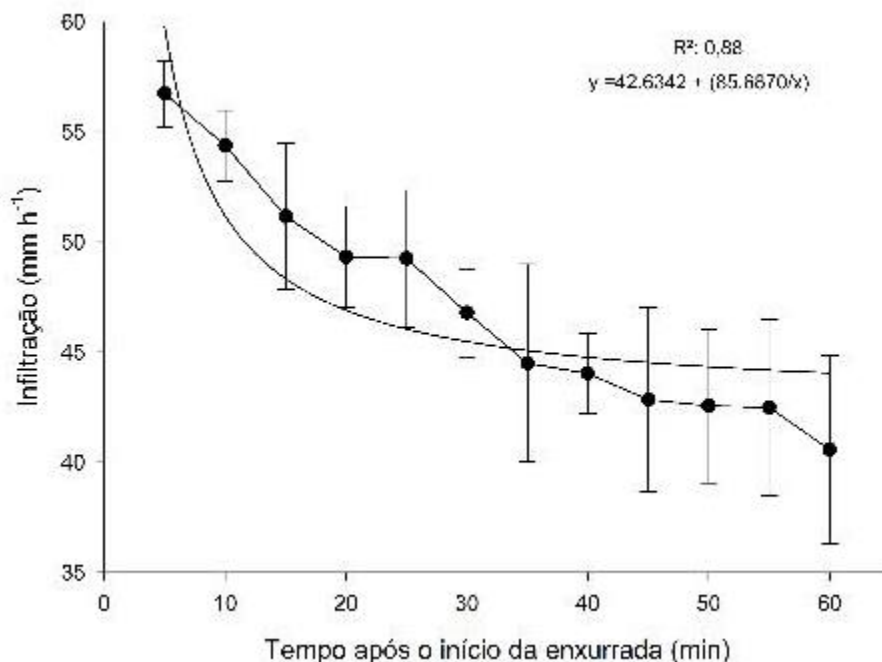


Figura 17. Curva de infiltração de água no solo durante chuva simulada no tratamento Testemunha com intensidade de 60 mm h⁻¹. Barras verticais: desvio padrão das amostras.

Apesar da diferença observada entre os valores calculados com auxílio do simulador de chuvas tipo Swanson e metodologia BEST simplificada, as metodologias que utilizam anéis volumétricos dão um bom indicativo para avaliações rápidas e comparativas em campo (FRANSOZI, 2020). Porém são pouco precisas para dimensionamento de sistemas conservacionistas.

4.3. Perdas de solo com chuva simulada e modelagem

O modelo WEPP® demonstrou boa resposta para as condições estudadas. A média de perda de solo para o tratamento convencional, utilizado para calibração, foi semelhante ao evidenciado em campo (Tabela 9).

Tabela 9. Perdas de solo (kg m⁻² h⁻¹) mensuradas com o simulador de chuvas tipo Swanson e modeladas com o WEPP® e infiltração do solo calculada com o simulador de chuvas (K_sS) e medido com a metodologia BEST® (K_sB).

	Convencional		Localizado		Reduzido	
	Erosão K _s S (kg m ⁻² h ⁻¹)	Erosão K _s B (kg m ⁻² h ⁻¹)	Erosão K _s S (kg m ⁻² h ⁻¹)	Erosão K _s B (kg m ⁻² h ⁻¹)	Erosão K _s S (kg m ⁻² h ⁻¹)	Erosão K _s B (kg m ⁻² h ⁻¹)
WEPP®	0,002	0,0	0,001	0,0	0,001	0,0
Simulador de Chuvas Tipo Swanson	0,002	-	-	-	-	-

Os valores de perda de solo encontrados para o tratamento Convencional corroboram com os evidenciados por BRAMORSKI & CRESTANA, (2020), em solo com textura média e mesma metodologia de preparo. A maior perda de solo para o tratamento convencional deve-se à maior desagregação do solo proporcionada pelo maior número de operações de preparo mecânico do solo realizadas no tratamento (SOBRINHO et al., 2003). A maior desagregação, aliada ao efeito do selamento superficial ocorrido e analisado mediante o cálculo da infiltração, foram fatores determinantes para a maior perda de solo observada no tratamento Convencional. Na literatura é possível encontrar vários trabalhos que evidenciam o comportamento de maior perda de solo para metodologias de preparo convencional comparado às demais, com ou sem cobertura e diferentes culturas de cobertura (COGO et al., 2003; DE LIMA & CASSOL, 2003). Tal comportamento corrobora com o resultado obtido no presente estudo.

Observa-se redução em 50% da perda de solo modelada com o emprego das metodologias de preparo localizado e Reduzido. A menor perda de solo nesses preparos deve-se ao menor revolvimento do solo, por conta do menor número de operações realizadas e também pelo aumento expressivo de infiltração evidenciado para o tratamento Localizado na posição Centro do Canteiro (Tabela 8). A mudança de sistema de preparo para localizado possibilitou menor área compactada (área de tráfego) e menor desagregação. Logo, foi possível aumentar a infiltração de água no solo no local Centro do Canteiro, quando comparados T0 e T1, o que possibilitou a redução da perda de solo para o tratamento Localizado (BAPTISTA & LEVIEN, 2010; PAULA, 2015).

Para o tratamento Reduzido apresentou perda de solo semelhante ao tratamento localizado. Apesar de não haver mudança no sistema de preparo (apenas a operação de eliminação mecânica de soqueiras) se observou que as perdas de solo também reduziram em relação ao Convencional. Essa redução se deve ao fato de o referido tratamento possuir maior cobertura vegetal, o que implica em menores fatores de erodibilidade em sulcos e entressulcos (BAPTISTA & LEVIEN, 2010; PAULA, 2015). Porém era esperado maior volume de enxurrada produzida para este tratamento devido a não ter havido mudança no sistema de preparo devido a maior densidade do solo na posição centro do canteiro com relação aos demais tratamentos. Uma das hipóteses é que a não alteração da infiltração do solo nos tratamentos impossibilitou o modelo de realizar os cálculos de enxurrada, logo foram analisados os valores de infiltração de 60, 100 e 200 mm h⁻¹ para todos os tratamentos para evidenciar o efeito. Porém, não se observou diferença no volume de enxurrada para os valores de 60 e 100 mm h⁻¹ e a perda de solo modelada foi de 0,0 kg m⁻² h⁻¹ para o valor de 200 mm h⁻¹. Prosseguiu-se uma análise na literatura para evidenciar a hipótese de maior concentração de sedimentos na enxurrada. GASPARINO B. SOUSA et al. (2012) chegaram a conclusão que a cobertura do solo é um fator importante na atenuação de perdas de solo por erosão hídrica. Houve redução significativa quando a cobertura vegetal foi superior a 50%. Essa conclusão corrobora com os resultados do estudo e pode evidenciar a importância da cobertura vegetal, utilizada também como fator de cálculo de K_i e K_c e τ_c , no presente estudo.

Tabela 10. Enxurrada ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$) mensurada com o simulador de chuvas tipo Swanson e modeladas com o WEPP® e infiltração do solo calculada com o simulador de chuvas (K_sS) e medido com a metodologia BEST® (K_sB).

	Convencional		Localizado		Reduzido	
	Enxurrada	Enxurrada	Enxurrada	Enxurrada	Enxurrada	Enxurrada
	K_sS	K_sB	K_sS	K_sB	K_sS	K_sB
	($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$)	($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$)	($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$)	($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$)	($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$)	($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$)
WEPP®	91,9	0,0	91,9	0,0	91,9	0,0
Simulador de Chuvas Tipo Swanson	129,34	0,0	-	-	-	-

Tanto a enxurrada (Tabela 10) quanto as perdas de solo (Tabela 9) modeladas utilizando-se a infiltração analisada com anéis mostrou-se inconsistente com os dados observados em campo. Esse efeito deve-se à elevada variabilidade espacial, temporal do K_s , além de efeitos como coluna de água e ausência de selamento superficial nessa metodologia de análise (POTT & DE MARIA, 2003). Logo, a metodologia de anéis para cálculo do K_s demonstrou baixa eficiência para calibração do modelo.

Foi evidenciado também uma correlação entre a erosão relativa e o coeficiente de infiltração (Figura 18). Tal relação reforça a importância do melhor entendimento dos processos de selamento superficial e comportamento físico hídrico do solo para estudos de erosão.

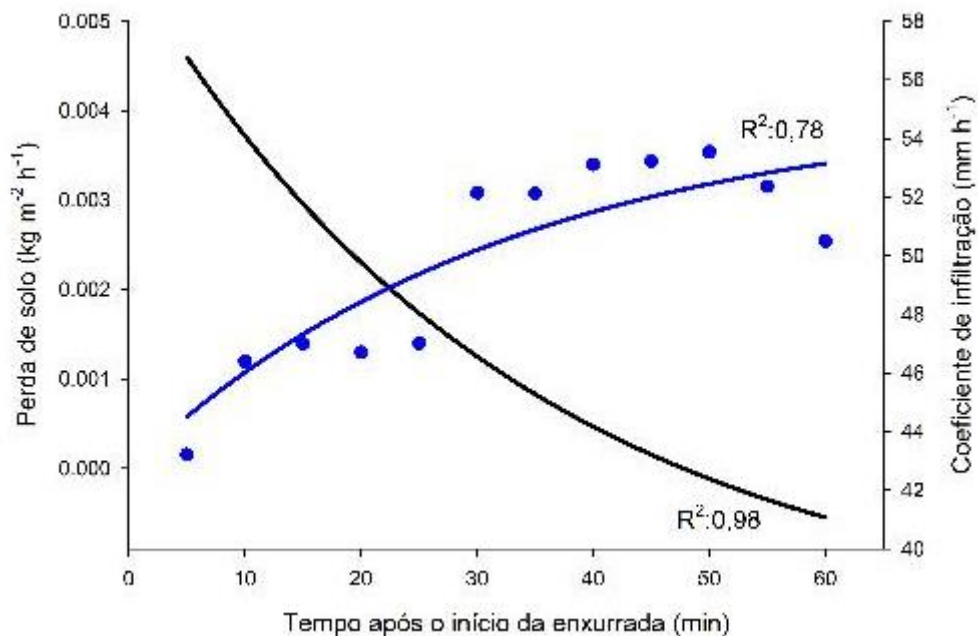


Figura 18. Comportamento da perda de solo ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) (azul) e coeficiente de infiltração (mm h^{-1}) (preto) no tratamento Testemha ao longo da simulação de chuva com intensidade de 60mm h^{-1} .

Observa-se que no início do ensaio a contribuição em perda de solo concentra-se na porção mais baixa da parcela. Na medida em que ocorre a saturação do solo nas porções mais altas da parcela, evidencia-se o aumento da erosão como observado na figura 18. Todas as parcelas foram previamente niveladas para padronização dos resultados, porém observa-se que a rugosidade residual do solo também é fator determinante e que reduz as perdas

do solo e o tempo para o início do escoamento, devido a pequenos volumes de água são armazenados na rugosidade do terreno. Esse efeito não foi medido no presente estudo, mas já há estudos que correlacionam inversamente o aumento da rugosidade com a perda de solo (BERTOL et al., 2006; L. G. CASTRO et al., 2006; J. F. SOUZA et al., 2020).

5. CONCLUSÕES

O modelo WEPP® se demonstra uma ferramenta eficiente para a modelagem de processos erosivos em reformas de canaviais e simulação de cenários de manejo, desde que levantados dados confiáveis e realizada a devida calibração.

O emprego de preparo reduzido e apenas eliminação de soqueiras são manejos que possibilitam redução da perda de solo durante a renovação de canaviais, enquanto que o preparo convencional resulta nas maiores perdas.

A metodologia de avaliação da infiltração BEST se difere dos dados levantados com auxílio do simulador de chuvas tipo Swanson. Logo, o entendimento dos demais processos envolvidos na dinâmica da água no solo é de suma importância para o entendimento da ocorrência de processos erosivos.

Não se observou efeito das operações de preparo em redução de densidade na linha de plantio e sim na entre-linha e centro do canteiro.

Não foi possível avaliar o impacto da MEIOSI, uma vez que o espaçamento entre-mudas de 0,7m não proporcionou o efeito de cordão vegetado esperado. Logo, a enxurrada passou levando sedimentos no espaço entre as plantas.

6. CONSIDERAÇÕES PARA FUTUROS PROJETOS

- 1) A porosidade total do solo poderia explicar vários resultados do presente trabalho, porém não foi analisada. Apesar da densidade do solo ser um bom indicativo, a medição da porosidade tornaria a discussão mais completa.
- 2) O selamento superficial é um fenômeno de suma importância na ocorrência de processos erosivos em campo. Logo novos estudos entendendo a sua dinâmica serão de grande importância para o entendimento da perda de solo.
- 3) Para estudos envolvendo a utilização de MEIOSI é importante entender a disposição das linhas de plantio, uma vez que o efeito de contensão da enxurrada pode ser suprimido a depender do espaçamento entre plantas na linha de plantio.
- 4) O modelo WEPP® apresentou baixa sensibilidade aos parâmetros de manejo e elevada para os parâmetros de solo e relevo. Logo, outros modelos podem ser testados para avaliar a resposta do manejo à perda de solo. As adequações realizadas no presente trabalho, foram realizadas nos atributos de solo, arquivo *.sol* do WEPP®.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. D. E. (2000). Queima da Cana : Implicações Jurídicas e Sociais. *Ministério Público Do Estado de São Paulo*.
http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/documentacao_e_divulgacao/doc_biblioteca/bibli_servicos_produtos/bibli_boletim/bibli_bol_2006/RDC_04_45.pdf
- ARCOVERDE, S. N. S., DE SOUZA, C. M. A., NAGAHAMA, H. D. J., MAUAD, M., ARMANDO, E. J., & CORTEZ, J. W. (2019). Growth and sugarcane cultivars productivity under no-tillage and reduced tillage system. *Revista Ceres*, 66(3), 168–177. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201966030002>
- ARGENTON, J., ALBUQUERQUE, J. A., BAYER, C., & DO PRADO WILDNER, L. (2005). Structural attributes of a clayey hapludox cultivated under distinct tillage methods and cover crops. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 29(3), 425–435. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832005000300013>
- BAGARELLO, V., D'ASARO, F., & IOVINO, M. (2012). A field assessment of the Simplified Falling Head technique to measure the saturated soil hydraulic conductivity. *Geoderma*, 187–188, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.04.008>
- BAPTISTA, J., & LEVIEN, R. (2010). Métodos de preparo de solo e sua influência na erosão hídrica e no acúmulo de biomassa da parte aérea de Eucalyptus Saligna em um cambissolo háplico da depressão central do Rio Grande do Sul. *Revista Árvore*, 34(4), 567–575. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622010000400001>
- BARBOSA, L. C., MAGALHÃES, P. S. G., BORDONAL, R. O., CHERUBIN, M. R., CASTIONI, G. A. F., TENELLI, S., FRANCO, H. C. J., & CARVALHO, J. L. N. (2019). Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. *Soil and Tillage Research*, 195(August), 104383. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104383>
- BARCELOS, A. A., CASSOL, E. A., & DENARDIN, J. E. (1999). Infiltração de água em um Latossolo vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 23(1), 35–43. <https://doi.org/10.1590/s0100-06831999000100005>
- BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. D. S. (2019). Manejo e conservação do solo e da água. In *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo* (1st ed., Vol. 1).
- BERTOL, I., AMARAL, A. J. DO, VÁZQUEZ, E. V., GONZÁLEZ, A. P., BARBOSA, F. T., & BRIGNONI, L. F. (2006). SEÇÃO VI - MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 30(4), 543–555.

- BRAMORSKI, J., & CRESTANA, S. (2020). Erosão hídrica em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de manejo e chuva simulada. *Revista Sítio Novo*, 4(2), 73. <https://doi.org/10.47236/2594-7036.2020.v4.i2.73-80p>
- CARDOSO, R. C. ;, & CAMPOS, A. C. (2009). *Impactos Ambientais Causados Por Processos Erosivos No Parque Carmo Bernardes No Município De Goiânia , Goiás . 1*, 1–9.
- CARVALHO, M. L., DA LUZ, F. B., DE LIMA, R. P., CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V., CARVALHO, J. L. N., & CHERUBIN, M. R. (2022). Assessment of Soil Physical Quality and Water Flow Regulation under Straw Removal Management in Sugarcane Production Fields. *Sustainability (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/su14020841>
- CASSIANO, M. S. (2005). DESEMPENHO OPERACIONAL DE UM SUBSOLADOR EM FUNÇÃO DA ESTRUTURA, DO TEOR DE ARGILA E DE ÁGUA EM TRÊS LATOSSOLOS. *Leonardo*.
- CASTRO, L. G., COGO, N. P., & VOLK, L. B. D. S. (2006). Alterações Na Rugosidade Superficial Do Solo Pelo Preparo E Pela Chuva E Sua. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 30(1), 339–352.
- CASTRO, P. R. C. (2016). *Fisiologia aplicada à cana-de-açúcar* (1st ed.). Sociedade dos técnicos açucareiros do Brasil (STAB).
- CHERUBIN, M. R., KARLEN, D. L., FRANCO, A. L. C., TORMENA, C. A., CERRI, C. E. P., DAVIES, C. A., & CERRI, C. C. (2016). Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, 267(2016), 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>
- COGO, N. P. (1988). Conceitos e princípios científicos envolvidos no manejo de solos para fins de controle da erosão hídrica. In *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo* (pp. 249–262).
- COGO, N. P., LEVIEN, R., & SCHWARZ, R. A. (2003). Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 27(4), 743–753. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832003000400019>
- CORRECHEL, V. (1998). *DENSIDADE DO SOLO : INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO RELATIVA À LINHA DE PLANTIO EM DOIS SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO* *Engenheira Agrônoma Estado de São Paulo - Brasil*.
- CORSINI, P. C., & FERRAUDO, A. S. (1999). Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em latossolo roxo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34(2), 289–298. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x1999000200017>

- CORTEZ, L. (2013). Subsolagem em profundidade variada com base no mapeamento de áreas de manejo específico. *Dissertação*.
- DA LUZ, F. B., CASTIONI, G. A. F., TORMENA, C. A., DOS SANTOS FREITAS, R., CARVALHO, J. L. N., & CHERUBIN, M. R. (2022). Soil tillage and machinery traffic influence soil water availability and air fluxes in sugarcane fields. *Soil and Tillage Research*, 223(June). <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105459>
- DE MARIA, I. C.; DRUGOWICH M. I.; BORTOLETTI J. O.; VITTI A. C.; ROSSETTO R.; FONTES J. L.; TCATCHENCO, J. . M. S. M. F. (2016). Recomendações gerais para conservação do solo na cultura da cana-de-açúcar. *Boletim Técnico LAC*, 216, 400. http://www.cdrrs.sp.gov.br/portal/themes/unify/arquivos/produtos-e-servicos/acervo-tecnico/producao_vegetal/Recomendacoes-Cons-Solo-Cana-2016.pdf
- DI PRIMA, S., BAGARELLO, V., LASSABATERE, L., ANGULO-JARAMILLO, R., BAUTISTA, I., BURGUET, M., CERDÀ, A., IOVINO, M., & PROSDOCIMI, M. (2017). Comparing Beerkan infiltration tests with rainfall simulation experiments for hydraulic characterization of a sandy-loam soil. *Hydrological Processes*, 31(20), 3520–3532. <https://doi.org/10.1002/hyp.11273>
- DIAS, L. C. S. ., ZANIN, R. ., & TAMELLINE, J. A. (1995). Produção de cana pelo sistema de MEIOSI. *Sociedade Dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros Do Brasil (STAB)*, 14, 13–15.
- DJI. (2021). *DroneDeploy*. <https://www.dronedeploy.com/>
- ELISSON, W. D. (1947). Soil erosion studies. *Agricultural Engineering*, 28.
- ENVIRONMENTAL RESEARCH INSTITUTE (ESRI). (2016). *ArcGIS desktop 10.4*. <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop>
- ESWARAN, H.; LAL, R.; REICH, P. F. (2001). Land degradation: an overview. In S. S. BRIDGES, E. M.; I. D. HANNAM, L. R.; OLDEMAN, F. W. T.; PENING DE VRIES, S. J.; SCHERR (Ed.), *Responses to Land Degradation*. International Conference on Land Degradation and Desertification.
- FARIA, V. G. DE. (2016). *Priorização de áreas para restauração florestal visando conservar solo, água e biodiversidade em paisagens agrícolas*. Universidade de São Paulo.
- FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, T. (2007). Water Erosion Prediction Project (Wepp). *Transactions of the ASABE*, 50(5), 1603–1612.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). (2015). Status of the World's Soil Resources. In I. V. Lucrezia Caon, Nicoletta Forlano, Cori Keene, Matteo Sala, Alexey Sorokin & C. Ward. (Eds.), *Intergovernmental Technical Panel on Soils*. www.fao.org/publications%0Ahttp://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf

- FOSTER, G. R. (1980). Conservation practices in erosion models. In *Proceedings of conservation in the 80's - an international conference on soil conservation* (p. 273).
- FRANSOZI, A. A. (2020). O papel da vegetação florestal secundária nas funções e processos hidrológicos em bacias agrícolas. *Tese de Doutorado*, 36.
- FUNDAÇÃO ABC. (2021). *Classificação climática de Köppen do Estado de São Paulo*. Sistema de Monitoramento Agrometeorológico. https://sma.fundacaoabc.org/climatologia/classificacao_climatica/sao_paulo
- GOMES, M. G. D. S. (2019). Perdas de solo, nutrientes e água por erosão e o subfator CiII em Argissolo e Latossolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. *Dissertação (Mestrado)*.
- GRAYSON, R. ., & BLOSCHL, G. (2001). Spatial patterns in catchment hydrology: observations and modeling. *Cambridge University Press*, 416.
- GUERRA, A. J. T. (1998). Processos erosivos nas encostas. *Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos*, 3, 149–209.
- JUNIOR, P. R. D. L., & FILHO, M. V. M. (2009). PADRÃO ESPACIAL DA ERODIBILIDADE EM SULCOS EM UM LATOSSOLO. *Simpósio de Geostatística Aplicada Em Ciências Agrárias*, 64, 2–5.
- KLEIN, V. A. (2006). Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um latossolo vermelho. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 5(1), 26–32. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2008001100018&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt
- KRZIC, M., BULMER, C., RAHMAN, S., & DAMPIER, L. (2003). *Relative measure of bulk density to characterize compaction of forest soils caused by harvest Table of Contents*. 1–45.
- LASSABATÈRE, L., ANGULO-JARAMILLO, R., SORIA UGALDE, J. M., CUENCA, R., BRAUD, I., & HAVERKAMP, R. (2006). Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments-BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 521–532. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0026>
- LIMA, C. C. DE, MARIA, I. C. DE, & FIGUEIREDO, G. C. (2015). Parâmetros radiculares em sistema canteirizado e cultivo convencional de cana-de-açúcar. *XXXV Congresso Brasileiro de Ciência Do Solo*, d(1), 3–6.
- LIMA, V. S. DE, & CASSOL, E. A. (2003). Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo - Interrill soil erosion under different tillage and management systems. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38(1), 117–124. http://www.scielo.br/pdf/pab/v38n1/a16v38n1.pdf%0Ahttp://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt&pid=S0100-204X2003000100016

- MARASCA, I., LEMOS, S. V., SILVA, R. B., GUERRA, S. P. S., & LANÇAS, K. P. (2015). Compactação do solo em um latossolo vermelho cultivado com cana-de-açúcar utilizando equipamento de preparo profundo e canteirizado do solo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 39(5), 1490–1497. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140559>
- MARIN, F. (2019). De olho na produção: Qual a estimativa da safra 2019/2020? *Expedição Custos Cana - Pecege/ESALQ-USP*.
- MARTINI L. C. P.; UBERTI, A. A. A.; SCHEIBE, L. F.; COMIN, J. J.; DE OLIVEIRA, M. A. T. (2006). Avaliação da Suscetibilidade a Processos Erosivos e Movimentos de Massa: Decisão Multicriterial Suportada em Sistemas de Informações Geográficas. *Revista Do Instituto de Geociências - USP*, 6, 41–52. <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GUSPSC/article/view/1113>
- MARTINS FILHO, M. V., LICCIOTI, T. T., PEREIRA, G. T., MARQUES, J. M., & SANCHEZ, R. B. (2009). Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, 29(1), 8–18. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000100002>
- MINKOWSKI, M., & RENSCHLER, C. (2008). *GeoWEPP for ArcGIS 9.x Full Version Manual*. 110.
- NETO, J. M. D. F., COUTINHO, A. P., DI PRIMA, S., BEZERRA, S. D. T. M., NETO, S. M. D. S., RABELO, A. E. C. D. G. D. C., DE OLIVEIRA, A. L., & ANTONINO, A. C. D. (2021). Variability and spatial distribution of hydrodynamic properties in soil with preserved caatinga. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 26. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210058>
- PAULA, D. T. D. (2015). *Perdas de nutrientes e sedimento por erosão e seus efeitos na qualidade da água*. 53.
- PERTUSSATTI, C. A., SOBRINHO, T. A., REBUCCI, L. C. S., BUCHALA, D., RODRIGUES, B., TARSO, P., & OLIVEIRA, S. DE. (2011). Erosão Hídrica E Infiltração De Água Sob Diferentes Tipos E Cobertura De Solo. *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 1–12.
- PEYRET, F., BÉTAILLE, D., & HINTZY, G. (2000). High-precision application of GPS in the field of real-time equipment positioning. *Automation in Construction*, 9(3), 299–314. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(99\)00058-8](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(99)00058-8)
- PIMENTEL, D., HARVEY, C., RESOSUDARMO, P., SINCLAIR, K., KURZ, D., MCNAIR, M., CRIST, S., SHPRITZ, L., FITTON, L., SAFFOURI, R., & BLAIR, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201), 1117–1123. <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>

- POTT, C. A., & DE MARIA, I. C. (2003). Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 27(1), 19–27. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832003000100003>
- REICHERT, J. M., & CABEDA, M. S. V. (1992). Salpico de partículas e selamento superficial em solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 16, 389–396.
- RENSCHLER, C. S. (2003). Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach. *Hydrological Processes*, 17.
- SCHAEFER, C. E. R., SILVA, D. D., PAIVA, K. W. N., PRUSKI, F. F., ALBUQUERQUE FILHO, M. R., & ALBUQUERQUE, M. A. (2002). Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(5), 669–678. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2002000500012>
- SMITH, D. M., INMAN-BAMBER, N. G., AND THORBURN, P. J. (2005). Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research*, 92.
- SOBRINHO, T. A., VITORINO, A. C. T., SOUZA, L. C. F. DE, GONÇALVES, M. C., & CARVALHO, D. F. DE. (2003). Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(2), 191–196. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662003000200001>
- SOUSA, GABRIEL BRUNO. (2011). Erosão em entressulcos e resíduos de cana-de-açúcar em cobertura. *Tese de Doutorado*.
- SOUSA, GASPARINO B., MARCÍLIO V. MARTINS FILHO, & MATIAS, S. S. R. (2012). PERDAS DE SOLO, MATÉRIA ORGÂNICA E NUTRIENTES POR EROSÃO HÍDRICA EM UMA VERTENTE COBERTA COM DIFERENTES QUANTIDADES DE PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM GUARIBA - SP. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, 1(32), 40–500.
- SOUZA, Z. M. DE, PRADO, R. D. M., PAIXÃO, A. C. S., & CESARIN, L. G. (2005). Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40(3), 271–278. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2005000300011>
- SOUZA, J. F., COSTA, A. G., MACHADO, T. D. A., & MARINS, M. D. O. (2020). Avaliação de perfis mobilizados do solo em função de diferentes tipos de preparo mecanizado. *Ciências Rurais Em Foco – Volume 7*, 7. <https://doi.org/10.36229/978-65-86127-54-6>
- SPAROVEK, G., BARRETTO, A., BERNDES, G., MARTINS, S., & MAULE, R. (2009). Environmental, land-use and economic implications of Brazilian sugarcane expansion 1996-2006. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14(3), 285–298. <https://doi.org/10.1007/s11027-008-9164-3>

- STONE, L. F., & SILVEIRA, P. M. (2001). Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 25(2), 395–401. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832001000200015>
- SWANSON, N. P. (1965). Rotating-boom rainfall simulator. *American Society of Agricultural Engineering*, 8, 72–72.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (2017). *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. http://www.cse.edu.uy/sites/www.cse.edu.uy/files/documentos/Licom_Camejo_2011-07-28.pdf
- UNICA. (2020). *Protocolo agroambiental*. União Da Indústria Da Cana de Açúcar (UNICA). <https://unica.com.br/iniciativas/protocolo-agroambiental/>
- VALIM, W. C., PANACHUKI, E., PAVEI, D. S., SOBRINHO, T. A., & ALMEIDA, W. S. (2016). Effect of sugarcane waste in the control of interrill erosion. *Semina: Ciências Agrárias*, 37(3), 1155–1164. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n3p1155>
- WISCHMEIER, W. H., & SMITH, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, 47.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Relatório de pós processamento do software DroneDeploy, de voo realizado com o drone Phantom 4 Pro V. 2.0, da marca DJI. Demonstrando acurácia e densidade de pixels. Foi sobrevoada a área ao entorno do ensaio para eliminar possíveis distorções nos vértices da imagem. Além disso, utilizados pontos georeferenciados para melhoria da precisão da imagem.

Experimento - Gustavo

Captured: Apr 24, 2021, Processed: May 28, 2021



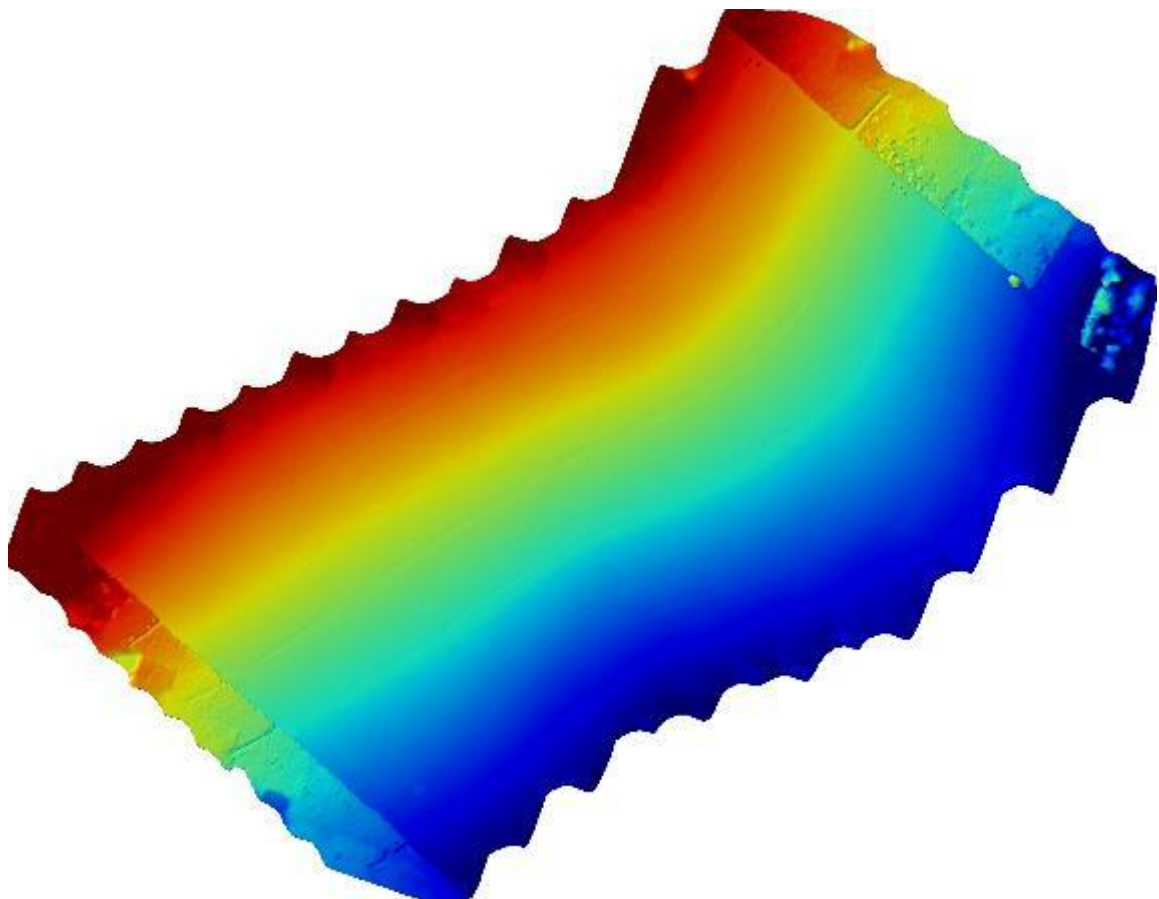
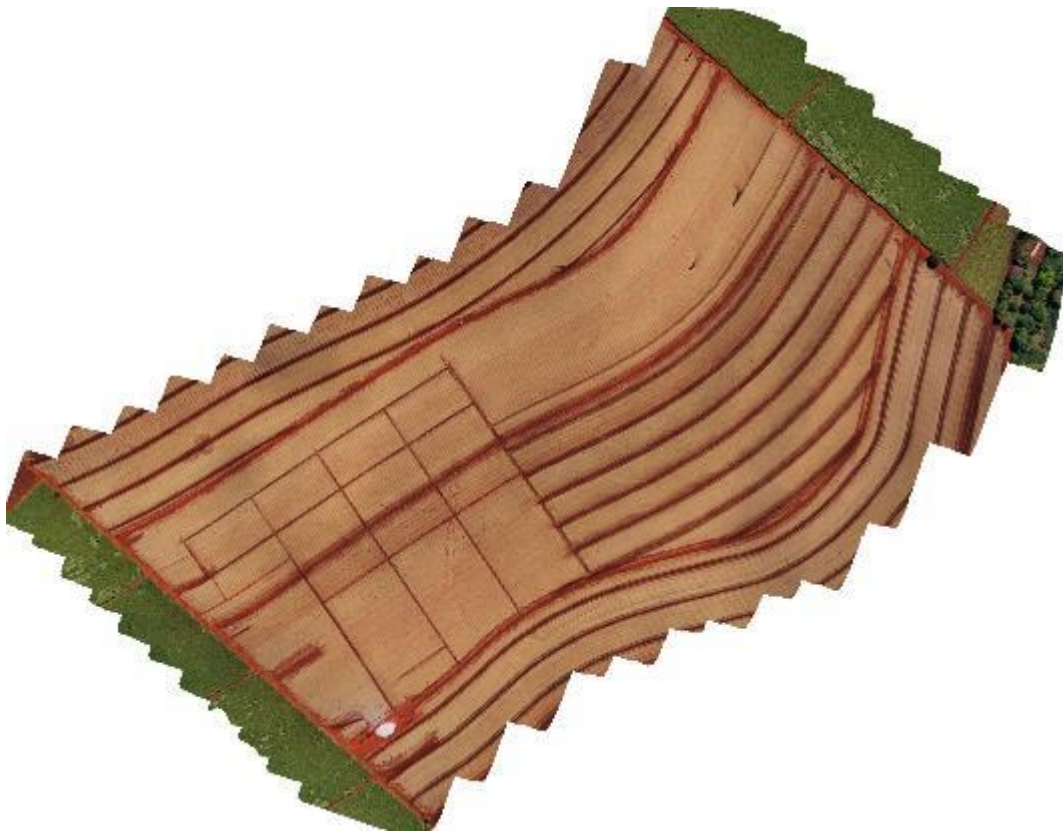
Map Details Summary

Project Name	Experimento - Gustavo - Experimento - Gustavo
Photogrammetry Engine	DroneDeploy Proprietary
Date Of Capture	Apr 24, 2021
Date Processed	May 28, 2021
Processing Mode	Standard
GSD Orthomosaic (GSD DEM)	3.08cm/px (DEM 12.33cm/px)
Area Bounds (Coverage)	70267073.93m ² (1%)
Image Sensors	Hasselblad - L1D-20c

Quality & Accuracy Summary

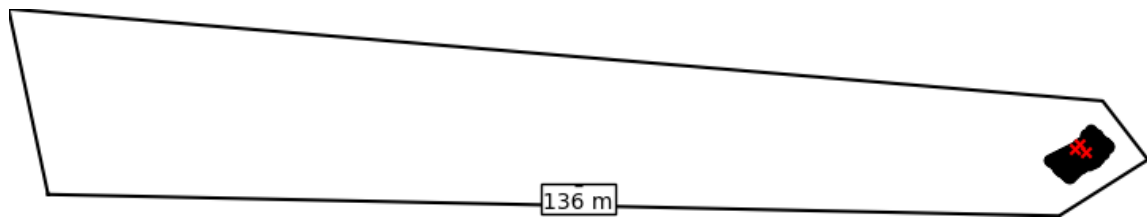
Image Quality	High texture images
Median Shutter Speed	1/120
Processing Mode	[Standard Mode - Designed to produce the best photogrammetry output based on the input imagery. Include predominantly nadir imagery for most efficient mapping of large fields and crops, natural open terrain, and generating topographical maps. Entirely nadir collects are not recommended for reconstructing the sides of buildings, overhangs, or complex equipment. Include horizontal and oblique imagery to optimize processing for high resolution 3D reconstruction of buildings, pipework & conveyors.]
Images Uploaded (Aligned %)	453 (99%)
Camera Optimization	0.00% variation from reference intrinsics
GCP & Checkpoint count	6 GCPs - Mean RMS Error 0.52cm

Preview



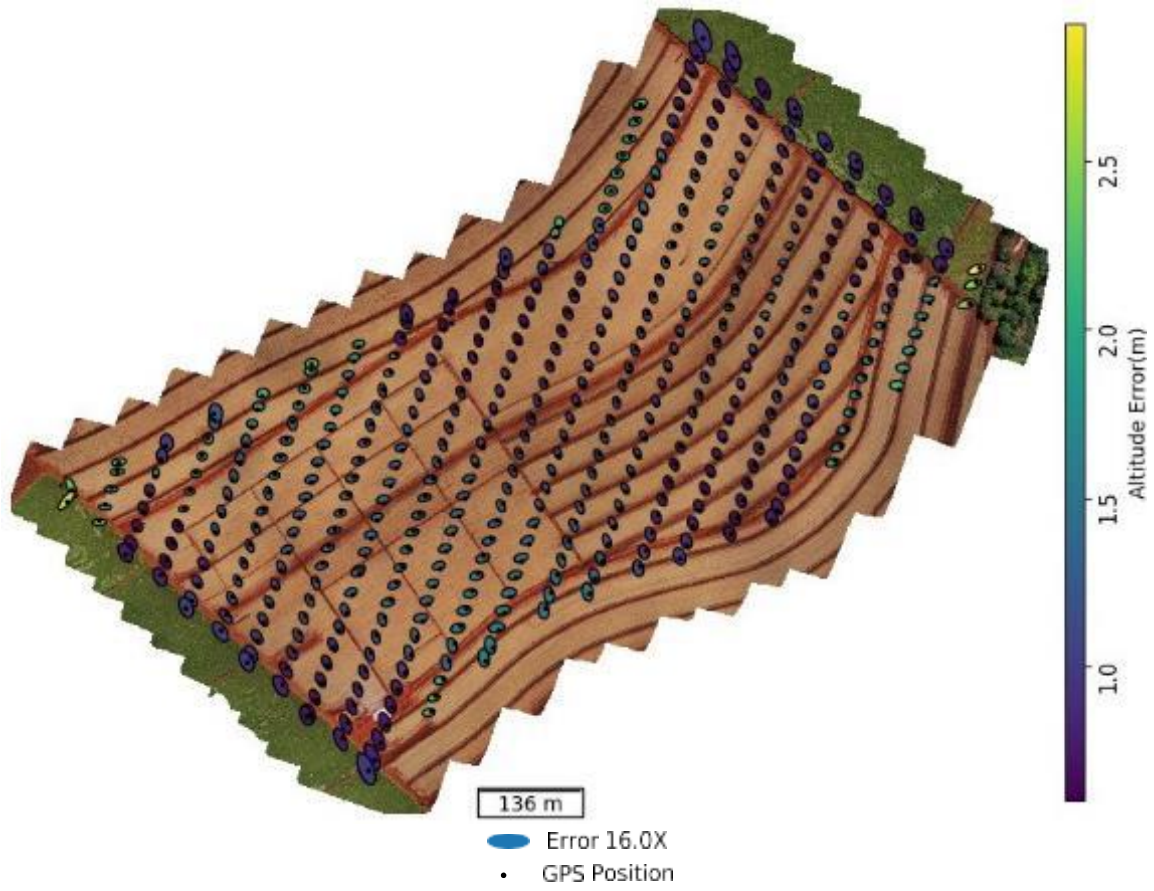
Dataset Quality Review

Orthomosaic Coverage



Sensor(s) Used	Hasselblad - L1D-20c
Image Count (by sensor)	453
Image Resolution	5472x3078 (~17MP)
Orthomosaic coverage (% of area of interest)	1.07
Average Orthomosaic Image Density within Structured Area	9 images/pixel
Median Shutter Speed	1/120

Structure from Motion

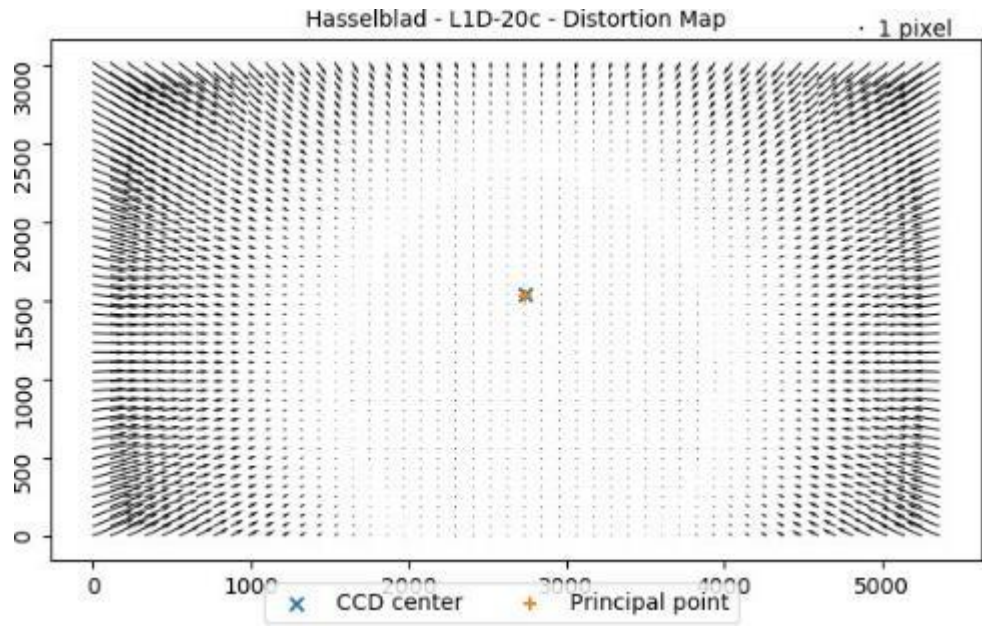


Aligned Cameras	99% 450/453
RMSE of Camera GPS Location	X 1.05m Y 3.45m Z 0.82m RMSE 2.13m

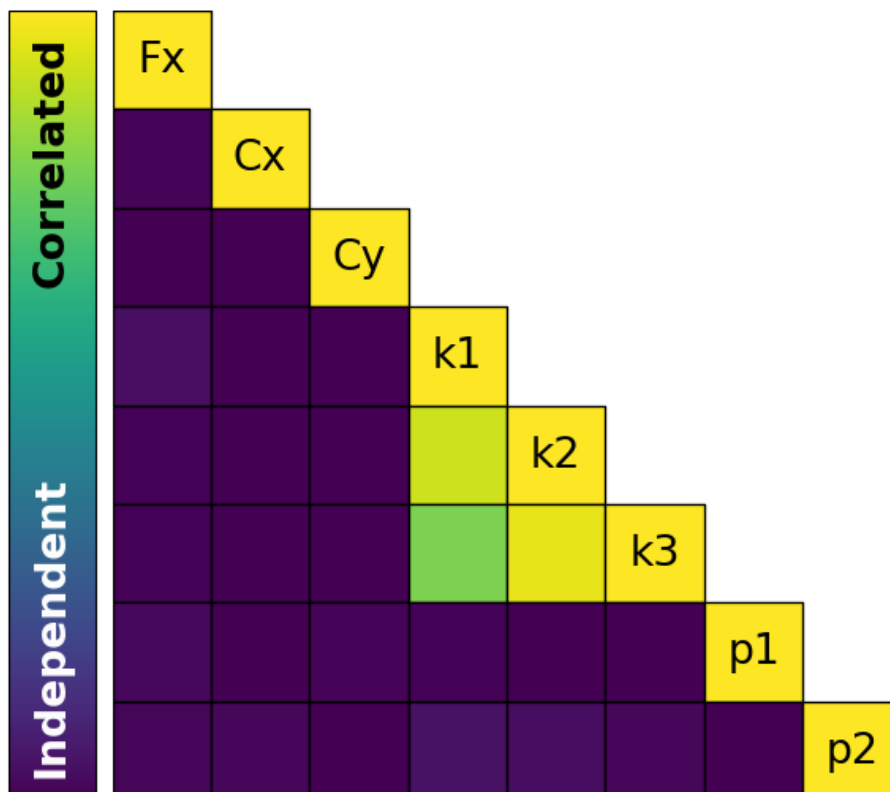
Camera Calibration

Camera Optimization	0.00% variation from reference intrinsics
---------------------	---

Hasselblad - L1D-20c

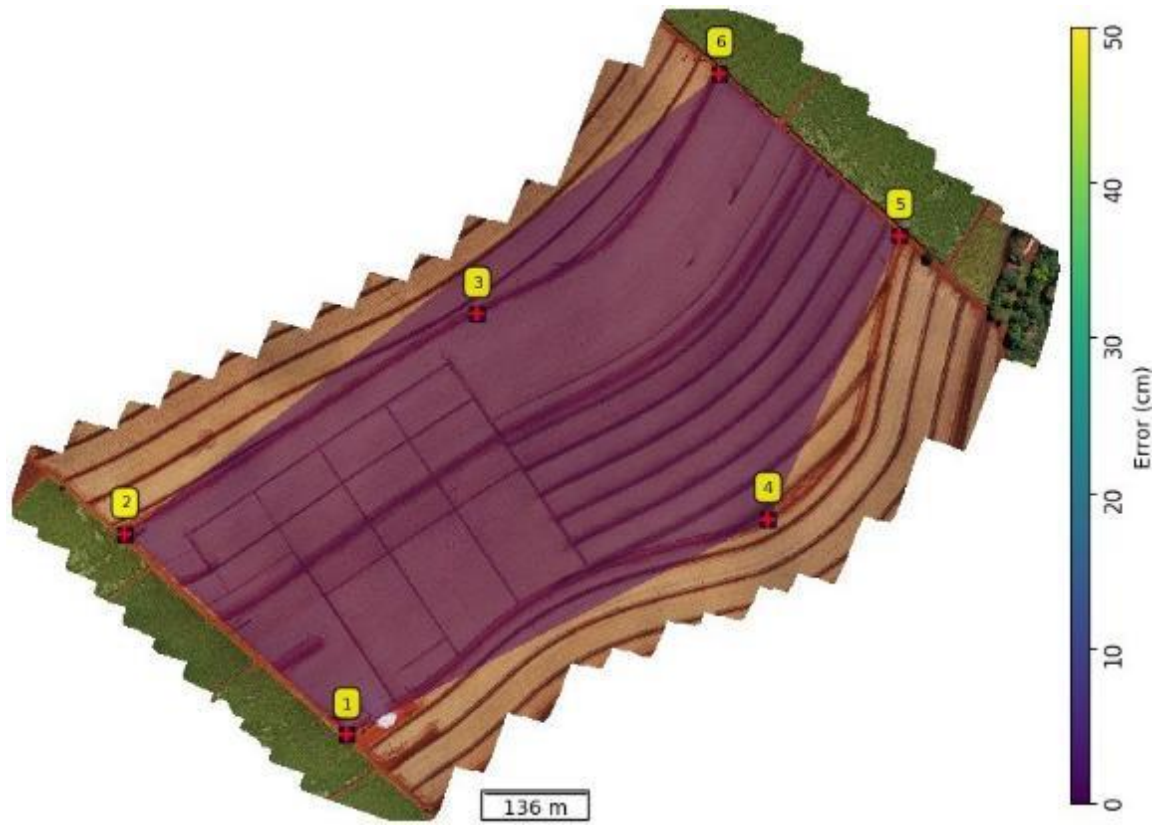


	Fx	Cx	Cy	k1	k2	k3	p1	p2
Value	4377.5	2740.3	1529.36	-0.0139672	-0.0130337	-0.000532066	-0.0016228	0.000153402
Error	0.181191	0.022939	0.0229129	0.283954	1.14717	1.47037	0.0116748	0.0162327



GCPs and Checkpoints

GCP & Checkpoint count	6 GCPs - Mean RMS Error 0.52cm
------------------------	--------------------------------



EPSG Code	EPSG-32722 - WGS 84 / UTM zone 22S
-----------	--

GCP Geolocation Error

GCP data is used to constrain the map reconstruction, so real world error between GCPs can ONLY be evaluated using Checkpoints. Error on GCPs is NOT representative of map error, instead it allows you to identify GCPs that have issues - for example incorrect survey locations, or that have been improperly tagged. Typical error should be less than a few centimeters for well tagged GCPs.

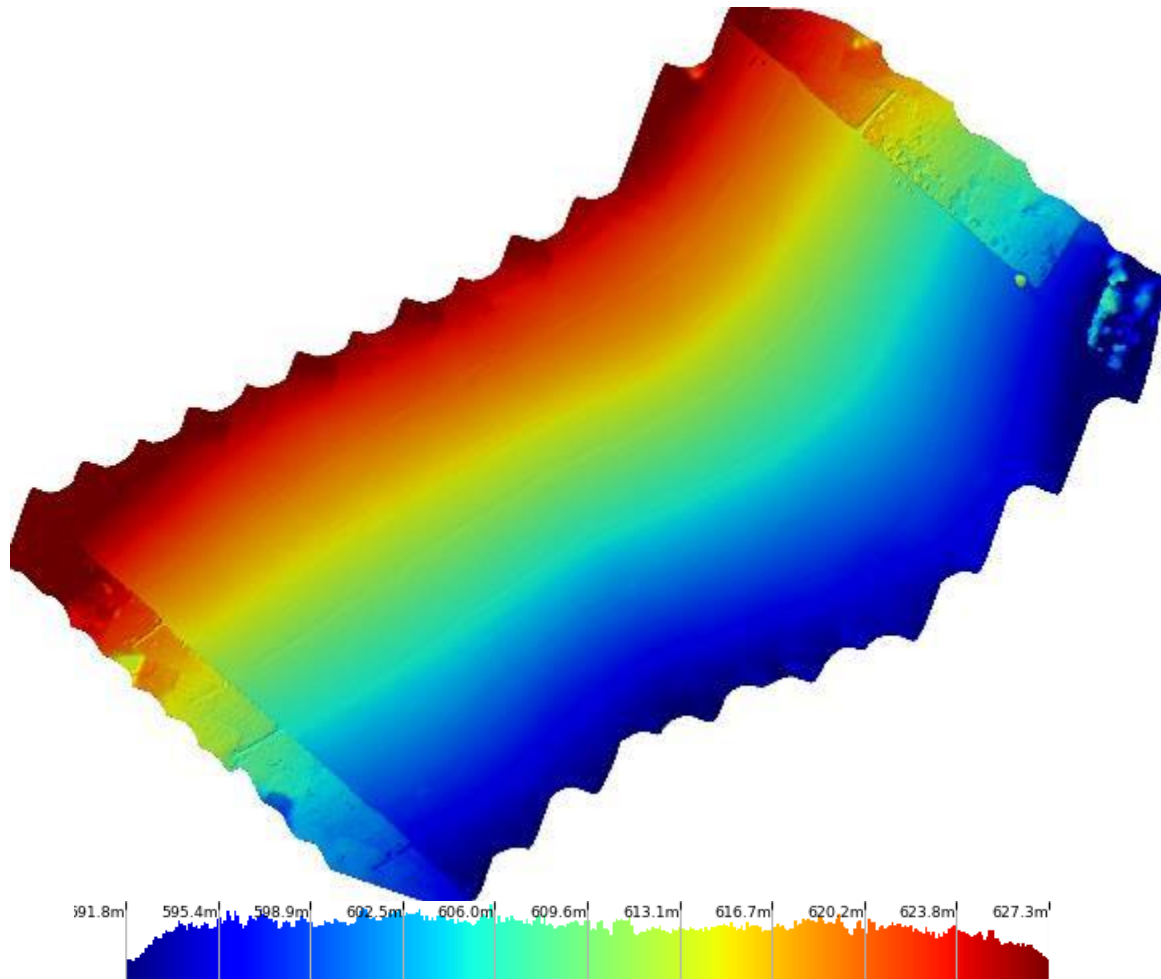
GCP Label		X Error (cm)	Y Error (cm)	Z Error (cm)
1		-0.3400	-0.4200	-0.2600
2		0.2600	-0.2600	-0.0100
3		1.1100	0.1000	0.0700
4		-1.0400	-0.4300	0.5200
5		-0.5800	0.7000	-0.4600
6		0.5900	0.3100	0.1500
Total (RMSE) Excludes Outliers		0.7282	0.4133	0.3101

Densification and Meshing

Processing Mode	[Standard Mode - Designed to produce the best photogrammetry output based on the input imagery. Include predominantly nadir imagery for most efficient mapping of large fields and crops, natural open terrain, and generating topographical maps. Entirely nadir collects are not recommended for reconstructing the sides of buildings, overhangs, or complex equipment. Include horizontal and oblique imagery to optimize processing for high resolution 3D reconstruction of buildings, pipework & conveyors.]
Processing Mode Quality	High
Nadir Images	99% Include oblique or horizontal images to improve reconstructions of man-made structures.
Oblique images	0%
Horizontal images	1%
Total Points	7.4 million
Point Cloud Density	9.80 points/m ²
Mesh Triangles	3.6 million

Digital Elevation Model

Mode	Generated from Mesh
DEM GSD	DEM 12.33cm/px
Relative/Absolute	Absolute Altitude vs GCPs

**DroneDeploy**

This map and report was produced with proprietary cloud photogrammetry software from DroneDeploy. [Provide feedback to improve this report](#)

APÊNDICE B. Arquivos de manejo empregado em cada um dos tratamentos empregados.

Tabela. Descritivo dos parâmetros de manejo simulados no WEPP® para o tratamento preparo convencional.

Tipo de Operação	Operação*	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
		Total de resíduos incorporados no solo na entrelinha para culturas não frágeis	100	%	Autor
		Total de resíduos incorporados no solo na entrelinha para cultura frágeis	100	%	Autor
		Número de linhas do implemento	4	-	Autor
		Tipo de implemento	Preparo do solo	-	Autor
		Posição de engate	Traseira	-	Autor
Preparo do solo	Grade intermediária	Altura do cume após a operação de preparo	0	cm	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
		Intervalo dos cumes	20	cm	Autor
		Percentual dos resíduos incorporados na linha	100	%	Autor
		Percentual dos resíduos incorporados na linha para culturas não frágeis	100	%	Autor
		Rugosidade do solo após a operação	0	cm	Autor
		Total de área preparada	100	%	Autor
		Média de profundidade do preparo	15	cm	Autor
		Total de resíduos incorporados no solo na entrelinha para culturas não frágeis	40	%	Autor
		Total de resíduos incorporados no solo na entrelinha para cultura frágeis	40	%	Autor
		Número de linhas do implemento	2	-	Autor
		Tipo de implemento	Cultivador	-	Autor
		Posição de engate	Traseira	-	Autor
Preparo do solo	Subsolador	Altura do cume após a operação de preparo	5	cm	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
		Intervalo dos cumes	150	cm	Autor
		Percentual dos resíduos incorporados na linha	100	%	Autor
		Percentual dos resíduos incorporados na linha para culturas não frágeis	100	%	Autor
		Rugosidade do solo após a operação	5	cm	Autor
		Total de área preparada	80	%	Autor

Média de profundidade do preparo	40	cm	Autor
----------------------------------	----	----	-------

*descrição atribuída pelo autor.

Tabela. Descritivo dos parâmetros de manejo simulados no WEPP® para o tratamento preparo Localizado.

Tipo de Operação	Operação*	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Preparo do solo	Subsolador	Total de resíduos incorporados no solo na entrelinha para culturas não frágeis	40	%	Autor
		Total de resíduos incorporados no solo na entrelinha para cultura frágeis	40	%	Autor
		Número de linhas do implemento	2	-	Autor
		Tipo de implemento	Cultivador	-	Autor
		Posição de engate	Traseira	-	Autor
		Altura do cume após a operação de preparo	5	cm	(FLANAGAN, DC; GILLEY, JE; FRANTI, 2007)
		Intervalo dos cumes	150	cm	Autor
		Percentual dos resíduos incorporados na linha	100	%	Autor
		Percentual dos resíduos incorporados na linha para culturas não frágeis	100	%	Autor
		Rugosidade do solo após a operação	5	cm	Autor
		Total de área preparada	80	%	Autor
		Média de profundidade do preparo	40	cm	Autor

APÊNDICE C. Parâmetros da “Single Storm” utilizada no WEPP®.

Data	Duração (h)	Precipitação Total (mm)	Intensidade Máxima (mm h ⁻¹)	Duração da intensidade máxima (h)
1/2/1*	1	60	60	100

*data atribuída pelo autor.