

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA



PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

BIANCA BATISTA BARRETO

**EQUIPAMENTO ÓPTICO E PORTÁTIL PARA
CARACTERIZAR AS CONDIÇÕES DA RUGOSIDADE DO
SOLO**

LAVRAS – MG

2020

BIANCA BATISTA BARRETO

**EQUIPAMENTO ÓPTICO E PORTÁTIL PARA CARACTERIZAR AS CONDIÇÕES DA
RUGOSIDADE DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de doutor.

Prof. Dr. Roberto Alves Braga Junior

Orientador

Dr. Blair McKenzie

Dr. Fernando Pujaico Rivera

Coorientadores

LAVRAS – MG

2020

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

Barreto, Bianca Batista.

Equipamento óptico e portátil para caracterizar as condições da
rugosidade do solo / Bianca Batista Barreto. - 2020.

118 p. : il.

Orientador(a): Roberto Alves Braga Junior.

Coorientador(a): Fernando Pujaico Rivera, Blair McKenzie.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Técnica óptica. 2. Rugosidade do solo. 3. Crosta superficial.
I. Braga Junior, Roberto Alves. II. Rivera, Fernando Pujaico. III.
McKenzie, Blair. IV. Título.

À Janete, minha mãe, e ao Afrânio, meu pai, pessoas que sempre me apoiaram e incentivaram.

Ao Guilherme, Rubinho e Duda, meus irmãos, pelo companheirismo e carinho.

Ao Miguel, meu sobrinho, pelas brincadeiras e diversões.

À Dona Amélia, Dona Nely e Sr. Zé Barreto, meus avós, por sempre torcerem por minha vitória.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre em cada passo da minha caminhada.

À minha mãe, Janete de Cássia Batista, pela dedicação, amor e incentivo nos momentos difíceis.

Ao meu pai, Afrânio Fortes Barreto, pelo apoio, confiança e carinho.

Aos meus irmãos, Guilherme Batista Barreto, Rubens Batista Barreto e Maria Eduarda Herthel Barreto, pela convivência, amizade e carinho.

Ao meu sobrinho, Miguel, pelos momentos de descontração.

Aos meus Avós, Amélia Brandão, Nely Fortes e José Barreto, mesmo não estando presente mais, sempre acreditaram na minha vitória.

A todos os meus familiares pelo incentivo.

À Gabriela Lopes Vieira Campos e Aline Silva Freitas, que mesmo à distância, estiveram sempre ao meu lado.

À República Saia Justa, pela irmandade e companheirismo.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao programa de Pós-Graduação, pela oportunidade de realização do curso, à CAPES, pela concessão da bolsa que tornou possível a realização deste trabalho e ao CNPq pela concessão da bolsa de Doutorado Sanduiche.

Ao Professor Roberto Braga, pela paciência, confiança, incentivo, amizade, apoio e ajuda, obrigada.

Ao Fernando Pujaco Rivera, por todo o apoio.

À Ellem e Elisângela, por todos os conselhos e amizade.

Ao Sr. Sérgio, por todo cuidado e atenção.

À Ana Luíza, Thiago, Daniel e todos os colegas do CEDIA, pela ajuda nos trabalhos desenvolvidos, paciência e momentos de descontração durante nossos cafés.

À Helem, secretária da Pós-Graduação, pela ajuda e paciência.

Agradeço a todos os professores e técnicos do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, que me proporcionaram conhecimento no decorrer desse período.

Ao The James Hutton Institute, pelo suporte nesta pesquisa durante o Doutorado Sanduiche, em especial ao Departamento Ecological Science.

Ao Blair McKenzie por ter me recebido e orientado tão bem no The James Hutton Institute, obrigada por todas as oportunidades!

Aos amigos queridos que fiz na Escócia, Hao, Matias, Desiré, Daniel, Jannifer, Lionel, Ilonca, Alice, Ilhom, Pilar, Karim, Mikel, Federico, Francesco e Eva, pelo carinho, amizade, compreensão e diversão, pelos coffee break, lunch time outside, cakes, dinners and drinks. Vocês dixaram esses momentos inesquecíveis!

À Barbara e Lorance, por me receberem nas suas casas e serem minha família na Escócia.

Enfim, todos aqueles que colaboraram de alguma forma para o cumprimento desta etapa da minha vida.

Obrigada!

RESUMO

O conhecimento da rugosidade superficial com consequente presença de crosta no solo constitui-se em importante informação para um manejo racional de recursos ambientais, como solo e água, pois contribui na determinação da propensão de um solo à erosão, ao fornecer indicações da sua capacidade de infiltração e armazenamento de água. A determinação das condições da rugosidade superficial do solo pode ser feita por métodos de contato e métodos sem contato. Os métodos de contato possuem valores e precisão inferiores quando comparados aos métodos sem contato. Além disso, quando aplicado a campo, os métodos sem contato necessitam de cuidados especiais. Com isso, objetivou-se neste trabalho desenvolver um equipamento óptico de baixo custo, portátil e robusto para caracterizar a rugosidade e a presença de crosta no solo, por meio do sistema de iluminação com laser de linha e visão monocular. A rugosidade média foi calculada pela diferença da altura entre um ponto e seus vizinhos e a presença de crosta pelo semivariograma. O equipamento desenvolvido foi utilizado em diferentes áreas experimentais, uma de erosão e outra de *Compost Barn*. Para a validação dos resultados, a rugosidade superficial das mesmas áreas analisadas pelo equipamento foi também analisada por técnicas já existentes, sendo, para área de erosão, a técnica comparada foi a técnica sem contato, Struct from Motion (SfM), e para *Compost Barn*, a técnica de contato, o rugosímetro de varetas. Além disso, foi realizado um teste de validação, analisando as condições da rugosidade do solo em diferentes culturas, cevada e feijão, e manejo, plantio direto e plantio convencional. Pelos resultados, verificou-se que o equipamento óptico desenvolvido para caracterizar a rugosidade superficial do solo e presença de crosta no solo mostrou-se válido e com resultados confiáveis.

Palavras-chave: Técnica óptica, rugosidade do solo, crosta superficial.

ABSTRACT

The knowledge about surface roughness with the consequent presence of crust on the soil is important information source for a rational management of environmental resources, such as soil and water, as it contributes to the determination of the propensity to erosion of the soil, by providing sources of its infiltration capacity and water storage. The soil surface roughness condition can be determined by contact and non-contact methods. Contact methods have lower values and needs when compared to non-contact ones. In addition, when being applied in the field, non-contact methods require special care. Therefore, the objective of this work was to develop a low-cost, portable and robust optical equipment to characterize the roughness and the presence of crust on the soil, through a lighting system with line laser and monocular vision. The average roughness was calculated by the difference in height between a point and its neighbors, and the presence of crust was determined by the semivariogram model. The developed equipment was used in different experimental areas, one of erosion and the other of Compost Barn. The results were validated using existing techniques, for the erosion area the technique compared was the non-contact technique, Struct from Motion (SfM), and for the Compost Barn, the technique of contact, the pin method. In addition, a validation test was realized, analyzing the conditions of soil roughness in different crops, barley and beans, and management, no-tillage and conventional tillage systems. The results induced that the optical equipment developed to characterize the soil surface roughness and the presence of crust on the soil is known to be valid and with relevant results.

Keywords: Optic technique, soil surface roughness, soil crust.

Lista de Figuras

Figura 1 Métodos mais comuns para caracterização da rugosidade superficial	10
Figura 2 Perfilômetro de varetas.....	12
Figura 3 Rugosímetro a laser e respectivo perfil tridimensional da superfície do solo obtido.....	14
Figura 4 Arranjo experimental da técnica composto por uma câmera, laser de linha e um luxímetro	17
Figura 5 Sistema Compost Barn.....	20
Figura 6 Implemento utilizado para revolvimento da cama sobreposta composto por subsolador e enxada rotativa	21
Figura 7 Configuração experimental básica desenvolvida	24
Figura 9 Objetos utilizados para a calibração da técnica com alturas conhecidas cone $z = 5$ cm, semiesfera $z = 8$ cm, xícara $z = 8$ e cubo $z = 5$ cm.....	26
Figura 10 Placa de gesso para simulação da passada do pneu do trator.....	26
Figura 11 Iluminação de CDs para calibração da técnica (a) um CD, (b) dois CDs sobrepostos, (c) três CDs sobrepostos e (d) quatro CDs sobrepostos.....	27
Figura 12 utilização do plano de referência (a) para identificação da variação da superfície (b) através de luz estruturada	28
Figura 13 Geometria da reconstrução do sistema por luz estruturada	28
Figura 14 Ilustração para a identificação da altura z do ponto	31
Figura 15 Imagem original da placa de gesso para (a) delimitação da área de corte das imagens e (b) corte da área delimitada	32
Figura 16 Decomposição da imagem em frequência de cores RGB (a) Red, (b) Green e (c) Blue.....	32
Figura 17 Imagem binarizada.....	33
Figura 18 (a) Imagem de referência e (b) identificação de cada ponto na curva	34
Figura 19 Exemplificação para o cálculo da rugosidade pelo programa CloudCompare	34
Figura 20 Exemplificação das iterações realizadas pela ferramenta k-means, identificando os diferentes centroides até que todos os dados pertençam aos mesmos grupos	35
Figura 21 Exemplificação do semivariograma	36
Figura 22 Delimitação das regiões de análise de erosão	37
Figura 23 Pontos de controle para o Georreferenciamento da área	38
Figura 24 Utilização do rugosímetro de varetas na área de Compost Barn.....	39
Figura 25 Delineamento experimental do teste da validação no qual as áreas em verde representam a testemunha, em três repetições NPA, NPB e NPC, enquanto as áreas em azul os diferentes tratamentos em quatro repetições identificados pelas letras de A até G. O azul.....	41
Figura 26 Forma cilíndrica enterrada no solo para extração da amostra sem deformação.....	42
Figura 27 Amostra de solo partida ao meio para cessar a rugosidade em 5 cm de profundidade	42
Figura 28 Setup óptico	43
Figura 29 Região de interesse da amostra de solo	44
Figura 30 Trapézio de coordenadas conhecidas para calibração da técnica.....	44
Figura 31 Processamento de imagens (a) área delimitada de corte dentro da imagem original, (b) imagem cortada e (c) imagem binarizada.....	45
Figura 32 (a) Objetos de coordenadas conhecidas para a calibração da técnica (b) identificação dos pontos (c) plotagem 3D da superfície	48
Figura 33 (a) Placa de gesso simulando a passada do pneu do trator, (b) identificação dos pontos e (c) plotagem 3D da superfície.....	49

Figura 34 Utilização de discos compactos a laser, CD, para verificação da sensibilidade da técnica (a) altura de um CD, (b) altura de dois CD's, (c) altura de três CD's e (d) altura de quatro CD's.....	50
Figura 35 Área de erosão com grande variação de profundidade em (a) comparação com as demais áreas, (b) vista superior dessas áreas demarcadas e (c) indicação da área demarcada para o corte do processamento de imagens.....	51
Figura 36 Processamento de imagens para a área de erosão (a) imagem original, (b) cor "green" da decomposição em RGB e (c) decomposição em RGB to cielab.....	53
Figura 37 Variação da rugosidade para amostra de erosão (a) identificação das coordenadas x, y, z de cada ponto, (b) plotagem 3D da superfície, (c) identificação dos pontos calculado da variação da rugosidade, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade, (e) semivariograma	54
Figura 38 Identificação da falha da técnica em (a) Identificação dos pontos da imagem 23, (b) imagem original 23 da Amostra 6, (c) identificação das coordenadas dos pontos de todas as imagens da Amostra 6 e (d) plotagem da superfície da Amostra 6; (e) identificação dos pontos da imagem 26, (f) imagem original 26 da Amostra 10, (g) identificação das coordenadas dos pontos de todas as imagens da Amostra 10 e (h) plotagem da superfície da Amostra 10.....	57
Figura 39 Imagens superficiais das áreas amostradas em (a) Amostra 16, (b) Amostra 8, (c) Amostra 21 e (d) Amostra 17.....	61
Figura 40 Processamento de imagens para a área de Compost Barn (a) imagem original, (b) cor "green" da decomposição em RGB e Threshold e (c) "Analyze Particle" e " Clear outside"	65
Figura 41 Variação da rugosidade para dados de Compost Barn antes da atividade do implemento (a) identificação das coordenadas x, y, z de cada ponto, (b) plotagem 3D da superfície, (c) identificação dos pontos calculados da variação da rugosidade, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade, (e) semivariograma e (f) identificação em vermelho das curvas com indicativo de presença de crosta.....	66
Figura 42 Identificação da falha da técnica em (a) Identificação dos pontos da imagem 23, (b) imagem original 23 da Amostra 15 Compost Barn, (c) identificação das coordenadas dos pontos de todas as imagens da Amostra 15 e (d) plotagem da superfície da Amostra 15	69
Figura 43 Variação da rugosidade para dados de Compost Barn depois da atividade do implemento (a) identificação das coordenadas x, y, z de cada ponto, (b) plotagem 3D da superfície, (c) identificação dos pontos calculados da variação da rugosidade, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade, (e) semivariograma e (f) identificação em vermelho das curvas com indicativo de presença de crosta.....	70
Figura 44 Comparação da variação de rugosidade pelos dois métodos em análise de uma área de Compost Barn antes da atividade do implemento, em que (a) identificação os pontos da variação da rugosidade pelo equipamento desenvolvido, (b) gráfico 3D da rugosidade do equipamento desenvolvido, (c) identificação dos pontos da variação da rugosidade pelo rugosímetro de varetas e (d) gráfico 3D da variação rugosidade pelo rugosímetro de varetas.....	73
Figura 45 imagens superficiais das áreas amostradas antes da atividade do implemento em (a) Amostra 5, (b) Amostra 20, (c) Amostra 15 e (d) Amostra 16.....	75
Figura 46 Imagens superficiais das áreas amostradas depois da atividade do implemento em (a) Amostra 1, (b) Amostra 4, (c) Amostra 2 e (d) Amostra 5	78
Figura 47 (a) Trapézio de coordenadas conhecidas para calibração da técnica (b) identificação dos pontos (c) plotagem 3D da superfície	81
Figura 48 Variação da rugosidade para amostra de cevada para plantio direto em (a) identificação das coordenadas x, y, z de cada ponto, (b) plotagem 3D da superfície, (c) identificação dos pontos calculados da variação da rugosidade, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade, (e) semivariograma e (f) identificação em vermelho de curvas com presença de crosta	83

Figura 49 Rugosidade média nos tratamentos, sendo que os pontos representam a Rugosidade Média e as barras em azul o intervalo de confiança de 95%..... 85

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	4
2 OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo geral.....	6
2.2 Objetivos específicos	6
3 REFERENCIAL TEÓRICO	7
3.1 Rugosidade superficial	7
3.2 Encrostamento superficial	9
3.3 Técnicas para caracterização da rugosidade do solo e presença de crosta.....	10
3.3.1 Rugosímetro de varetas	11
3.3.2 Rugosímetro a laser	12
3.3.3 Estereofotogrametria	14
3.3.4 Trabalhos comparando diferentes métodos.....	15
3.4 Técnicas ópticas.....	16
3.5 Processamento de imagens digitais.....	17
3.6 Índice de rugosidade	18
3.7 Estudo de caso	18
3.7.1 Erosão	19
3.7.2 <i>Compost Barn</i>	20
3.7.3 Sistemas de cultivo.....	22
4 MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 Desenvolvimento do equipamento	24
4.2 Calibração da técnica.....	25
4.3 Sensibilidade da técnica	26
4.4 Identificação do perfil do objeto por meio de visão monocular	27
4.4.1 Calculando a altura z	29
4.5 Processamento das imagens	31
4.5.1 Pré-processamento das imagens.....	31
4.5.2 Identificação das coordenadas x, y, z	33
4.5.3 Processamento de imagem para a caracterização da rugosidade.....	34
4.5.4 Processamento de imagens para caracterização da presença de crosta	35
4.6 Aplicação prática do equipamento em uma área de erosão	36
4.7 Aplicação em campo do equipamento em uma área de <i>Compost Barn</i>	38

4.8 Estatística dos dados	39
4.9 Aplicação Prática	40
4.9.1 Retirada das amostras do solo.....	40
4.9.2 Construção do novo setup óptico.....	42
4.9.3 Iluminação das amostras.....	43
4.9.4 Calibração do setup.....	44
4.9.5 Processamento de imagens.....	44
4.9.6 Análise Estatística.....	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 Arranjo experimental.....	47
5.2 Calibração da técnica de medição da rugosidade.....	47
5.3 Sensibilidade da técnica	49
5.4 Aplicação para área de erosão	51
5.4.1 Pré-processamento de imagens.....	52
5.4.2 Caracterização da rugosidade.....	53
5.4.3 Comparação da técnica desenvolvida com SfM.....	58
5.5 Aplicação em campo para <i>Compost Barn</i>	63
5.5.1 Pré-processamento de imagens.....	64
5.5.2 Caracterização da rugosidade.....	65
5.5.3 Comparação da técnica desenvolvida com rugosímetro de vareta	72
5.6 Aplicação prática.....	80
5.6.1 Construção do Setup.....	80
5.6.2 Calibração.....	81
5.6.3 Processamento de imagens.....	81
5.6.4 Caracterização da rugosidade.....	82
6 CONCLUSÕES	87
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, no mundo, cerca de 30% das terras têm alto ou médio grau de degradação. Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura (FAO, 2015), esse índice é devido à erosão, salinização, impermeabilização, poluição química e atividade agrícola. Estima-se que 24 bilhões de toneladas de solo fértil são perdidos por ano, e um quarto da superfície da Terra já foi degradado. A quantidade de solo fértil per capita caiu pela metade nos últimos 50 anos e a projeção é que caia novamente pela metade até 2050. Os dados são do grupo alemão Global Soil Forum e reforçam algo que o solo é finito e sua degradação traz impactos para a produção de alimentos e balanço climático. A enorme degradação dos solos se deve à falta de um plano de manejo. Associados a esses fatos, o preparo intensivo do solo nas práticas agrícolas e o pisoteio dos animais podem prejudicar sua estrutura, porosidade e aeração, infiltração da água e produtividade. Com isso, a exposição direta do solo ao impacto das gotas de chuva favorece a diminuição da rugosidade do solo, com o aparecimento de crostas superficiais que são fatores importantes na degradação do solo.

Uma das principais causas de degradação dos solos do planeta Terra é a erosão hídrica, sendo esse um problema que acompanha o homem desde as primeiras civilizações. Dentre as características físicas importantes na redução da erosão, destacam-se o estudo e o monitoramento da rugosidade superficial do solo, bem como as técnicas que a caracterizam. O conhecimento da rugosidade superficial com consequente presença de crosta no solo constituem-se em importante informação para um manejo racional de recursos ambientais, como solo e água, pois contribui para a determinação da propensão de um solo à erosão, ao fornecer indicações da sua capacidade de infiltração e armazenamento de água.

A rugosidade superficial do solo caracteriza-se pela presença de pequenas elevações e depressões na sua superfície, influenciando diretamente na maior permanência da água da chuva retida na superfície. O seu conhecimento constitui em importantes informações para um manejo racional de recursos ambientais, pois contribuem para a determinação da propensão de um solo à erosão, ao fornecer indicações da sua capacidade de infiltração e de armazenamento de água, e sua determinação pode ser feita por métodos destrutivos ou não destrutivos. A diminuição da rugosidade do solo favorece a formação de uma crosta na superfície do solo. Assim, a crosta superficial do solo é uma camada pouco regular, algumas vezes endurecida, com partículas de tamanho bem selecionado, que podem entupir os poros, prejudicando ou mesmo impedindo a infiltração da água no solo. A formação das crostas pode ser prejudicial para a agricultura e para o meio ambiente, pois causa alterações no solo, prejudicando sua estrutura, o que dificulta a infiltração de água, modificando sua rugosidade e porosidade, aumentando o escoamento superficial e, conseqüentemente, a erosão.

O conhecimento das condições da rugosidade do solo não é importante apenas da ciência do solo, mas também para outros materiais, como no caso do composto *Compost Barn*. O *Compost Barn* é um sistema de confinamento alternativo para vacas leiteiras, em que os animais ficam soltos e podem caminhar livremente dentro de um galpão, visando a melhorar o conforto e bem-estar animal e, conseqüentemente, os índices de produtividade do rebanho. O intuito do sistema é a compostagem da cama, preservando um ambiente seco e macio para as vacas, que por sua vez compactam a cama ao caminhar e deitar e, dessa forma, reduzem a quantidade de espaço de ar livre para penetrar no material, aumentando sua compactação e facilitando a fermentação.

A caracterização da rugosidade e presença de crosta na superfície do solo e composto pode ser feita com emprego de diversos tipos de aparelhos, por meio de diferentes técnicas de leitura, que variam desde métodos de simples determinações manuais aos mais sofisticados que permitem a leitura do microrelevo sem contato físico entre o aparelho e a superfície. Os métodos mais comuns são classificados como métodos de contato e métodos sem contato. Os métodos de contato geralmente são de baixo custo e fácil manuseio no campo; porém, possuem uma precisão baixa e destroem a superfície analisada, enquanto os métodos sem contato possuem alta precisão e confiabilidade dos dados e não destroem a superfície, porém apresentam alto custo de aquisição e requerem um treinamento técnico para manuseio em campo. Esses métodos se diferem quanto à precisão e à resolução obtidas, bem como aspectos práticos, como custos e capacidade de trabalho em campo.

Técnicas ópticas apresentam a vantagem de não ter a necessidade de contato físico com o objeto analisado, sendo assim, não destrutivas, além de permitir o uso da visão computacional como fator de análise, diminuindo, assim, a subjetividade do operador. Na Engenharia Agrícola, a técnica óptica vem sendo uma potencial ferramenta para aplicações em ciência do solo por sua grande sensibilidade e capacidade de análises em tempo real. Sendo assim, a hipótese desse trabalho foi que a técnica óptica desenvolvida teria resultados tão confiáveis quanto as técnicas tradicionais utilizadas para a caracterização da rugosidade do solo, com alta sensibilidade e baixo custo.

Portanto, objetivou-se neste trabalho desenvolver um equipamento óptico de baixo custo, portátil e robusto para caracterizar a rugosidade e a presença de crosta no solo, por meio do sistema de iluminação com laser de linha e visão monocular. O equipamento desenvolvido foi utilizado em diferentes áreas experimentais, uma de erosão e outra de *Compost Barn*. Para a validação dos resultados, a rugosidade superficial das mesmas áreas analisadas pelo equipamento foi também analisada por técnicas já existentes, sendo para área de erosão a técnica sem contato, Struct from Motion (SfM), e para *Compost Barn* a técnica de contato, o rugosímetro de varetas. Além disso, foi realizado um teste de validação, analisando as condições da rugosidade do solo em diferentes culturas, cevada e feijão, e manejo, plantio direto e plantio convencional.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um equipamento óptico, portátil e de baixo custo para identificar simultaneamente a presença de crosta superficial e obter o perfil do solo.

2.2 Objetivos específicos

- A) Desenvolver o equipamento óptico, portátil, robusto e de fácil aplicabilidade em campo.
- B) Ajustar o sistema de iluminação usando laser de linha para obter melhor identificação das características da superfície analisada.
- C) Desenvolver a técnica para a identificação das características da superfície analisada.
- D) Calibrar a técnica com objetos conhecidos para a identificação das coordenadas x,y,z de cada ponto da superfície.
- E) Iluminar um grupo de amostras de erosão para caracterizar as condições da rugosidade do solo e presença de crosta e validar os resultados com a técnica *Struct from Motion*.
- F) Iluminar um grupo de amostras compactada de *Compost Barn*, antes e depois da atividade do implemento agrícola, para caracterizar as condições da rugosidade do solo e presença de crosta e validar os resultados com a técnica do rugosímetro de vareta.
- G) Iluminar um grupo de amostras retiradas do solo, em 5 cm de profundidade, de diferentes culturas e diferentes manejos para acessar as condições de rugosidade e presença de crosta.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Rugosidade superficial

A rugosidade superficial do solo ou microrelevo é definido como o conjunto de suas características microtopográficas (HUANG, 1998). Em contraste aos elementos macroscópicos que se mantêm relativamente invariáveis em um espaço de tempo curto, a microtopografia do solo muda abruptamente em um curto intervalo de tempo (VIVAS MIRANDA, 2000) e é modificada por operações de preparo ou eventos de precipitação. A rugosidade superficial do solo afeta muitos processos, como a armazenagem superficial de água, a infiltração de água no solo e o transporte de sedimentos por meio do escoamento superficial (KAMPHORST et al., 2000). É dependente do tipo de solo, teor de água no momento do seu preparo, mas principalmente, do tipo e intensidade do preparo (ALLMARAS et al., 1967).

A rugosidade superficial do solo se caracteriza pela presença de pequenas elevações e depressões na superfície (BERTOL et al., 2007), influenciando diretamente na maior permanência da água da chuva das chuvas retida na superfície (VÁZQUEZ e GONZÁLEZ, 2003a). Além disso, adia o início do escoamento superficial, pelas microelevações e microdepressões funcionarem como barreira para diminuir a velocidade da água e reduzir a energia cinética presente no escoamento, dificultando assim o arraste e a condução dos agregados do solo. (MELLO, 2004; BERTOL et al., 2006; GUZHA, 2004). Vázquez e Gonzáles (2003) consideraram que a rugosidade superficial do solo é uma característica importante e que exerce forte influência sobre suas propriedades hidrológicas. Esses autores ainda citam o emprego do Índice de Rugosidade em modelos de predição do armazenamento temporário da água no solo, dada a importância da rugosidade para a determinação indireta da retenção de água no solo. Em outro trabalho, com o objetivo de estudar a rugosidade superficial do solo, início do escoamento e a capacidade de armazenamento nas depressões, Darboux et al., (2002) conduziram um experimento em laboratório com dois níveis de rugosidade e dois gradientes de inclinação, submetidos a testes de chuva simulada, Os variogramas experimentais mostraram uma diminuição gradual das semivariâncias de maneira homotética após cada precipitação adicional, indicando que todas as escalas de rugosidade são afetadas de forma semelhante.

O conceito de rugosidade do solo, inicialmente, era basicamente qualitativo, porém, Allmaras et al, (1967) consideraram necessário o emprego de variáveis mais objetivas para descrevê-la. A caracterização da rugosidade passou a ser realizada de forma quantitativa, medindo a altura das superfícies do solo em diversos pontos. Essas medidas podem ser feitas por métodos destrutivos, ou de contato, e por métodos telemétricos, ou não invasivos. Esses métodos de obtenção da rugosidade se diferem na dimensionalidade da medida (2D/3D), na precisão e na resolução em que podem ser obtidos (mm/cm), se a medida é realizada

pelo contato com a superfície do solo ou não, além dos aspectos práticos, tais como custos e viabilidade no campo (JESTER and KLIK, 2005; GILLIOT et al., 2017).

Outro conceito encontrado sobre a rugosidade superficial do solo é a caracterização pela medida da variabilidade identificada no microrelevo do solo e nas irregularidades superficiais que são determinadas pelo tamanho dos agregados, bem como das operações de preparo de solo e cujas medidas são feitas tradicionalmente por perfilômetros de hastes metálicas (BERTOLANI et al., 2000). Conforme descrito por Boller et al. (1997) e Levien et al. (2003), com as operações de preparo de solo ocorrem variações da rugosidade conforme o sistema empregado assim como os implementos utilizados, obtendo-se menor rugosidade com o emprego de grades e maior com o escarificador, sendo que a cobertura vegetal não se mostra influente, com maior significância sobre a rugosidade superficial do solo. Em outro estudo, ao considerar que o sistema de plantio direto somado ao trânsito do maquinário, impõe à redução da rugosidade superficial, modificação da estrutura do solo, causando a formação de uma crosta na superfície e gerando uma resistência à infiltração da água, Câmara e Klein (2005) analisaram os efeitos da escarificação para aumentar a rugosidade do solo e, portanto, a maior infiltração da água pela maior porosidade e menor densidade conferidas ao solo.

Os solos sob condições naturais geralmente apresentam rugosidade superficial baixa, primordialmente resultante da suavização da superfície ocasionada pela desagregação das partículas pelas gotas de chuva, ou devido ao tráfego sobre a superfície. A rugosidade da superfície do solo descoberto diminui com o passar do tempo, principalmente devido ao impacto das gotas de chuva sobre a superfície (ZOLDAN JUNIOR et al., 2006; RAMOS 2015). Dexter (1997) observou a diminuição linear da rugosidade com o acúmulo da energia da chuva. As gotas de chuva ocasionam o colapso dos torrões, o assento do solo e a desagregação dos agregados, depositando os sedimentos nas microdepressões, resultando na redução da rugosidade superficial e, adicionalmente, do selamento da superfície e diminuição da porosidade de infiltração de água.

Sendo assim, uma maior retenção e infiltração da água no solo, redução da velocidade e do volume do escoamento superficial amenizando os efeitos da erosão hídrica, são benefícios advindos do aumento da rugosidade superficial do solo obtida pelo preparo do solo (CARVALHO FILHO et al., 2007). Esses autores concluem, ressaltando sobre a necessidade de melhorar a metodologia para obtenção do índice de rugosidade, tradicionalmente obtido com o emprego de um perfilômetro.

3.2 Encrostamento superficial

O impacto das gotas de chuva na superfície do solo descoberto ocasiona uma série de efeitos: desintegração de agregados, arrastamento e deposição de partículas, causando erosão e modificando a estrutura do solo de várias formas. Uma das consequências desse processo é a formação de encrostamento superficial, característica comum em solos cultivados em várias regiões do mundo (HU et al., 2012; KINNEL, 2005). As partículas soltas presentes no solo são transportadas e depositadas em outras áreas, passam pelo processo de rearranjo, com a obstrução e o preenchimento dos macroporos. Com isso, ocorrem também os processos de alisamento e rebaixamento da superfície do solo. Após a secagem deste solo devido à ação do sol, a camada sofre uma contração formando uma camada densa e dura, com elevada resistência à penetração, dificultando a infiltração de água e germinação das sementes (ASSOULINE, 2004, LADO, BEM-HUR 2004).

A crosta superficial é uma camada pouco regular, algumas vezes endurecida, com partículas de tamanho bem selecionado, que se formam na superfície do solo, podendo entupir poros, prejudicando ou mesmo impedindo a infiltração da água no solo, cuja espessura pode variar de 0,1 até 50 mm, podendo apresentar rachaduras (FOX et al., 2004; FOX; LE BISSONNAIS 1998; VALENTIN 1995).

O processo de encrostamento é favorecido pelo teor de umidade do solo, intensidade e duração do evento chuvoso, condições climáticas (ELTZ; NORTAN, 1997; VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2010), mas principalmente depende de fatores externos, como tipo e intensidade do preparo mecânico do solo (BERTOL et al., 2006; KAMPHORST et al., 2000), além de depender também da compactação do solo que favorece seu aparecimento (ZOLDAN JUNIOR, 2006).

Diversos estudos abordando o encrostamento do solo têm sido realizados, desde o início do século XXI. Contudo, o interesse no fenômeno continua em razão das suas importantes consequências no meio ambiente e sua importância econômica (SOUZA et al., 2014, BADORRECK et al., 2013; BREMENFELS et al., 2013; SAJJADI; MAHMOODABADI, 2015).

Ao avaliar o processo que afeta a terra arável para o desenvolvimento de sementes, Lewis et. al., (2013) observaram que a erosão está presente no solo em diferentes séries de escalas, em todo o processo de formação da crosta, desde o arraste de partículas individuais até o transporte e armazenamento em outras áreas.

Estudando a morfologia de crostas superficiais na Alemanha, Badorreck, Gerke e Hüttl (2013) sugeriram que o tipo de crosta em combinação com a textura do solo influencia as propriedades hidráulicas de superfície, com menores valores de condutividade hidráulica não saturada na presença de crostas.

Em uma outra observação, Sajjadi e Mahmoodabadi (2015) avaliaram a quebra de agregados e formação de encrostamento superficial em solos do Irã, e verificaram que a taxa de infiltração de água

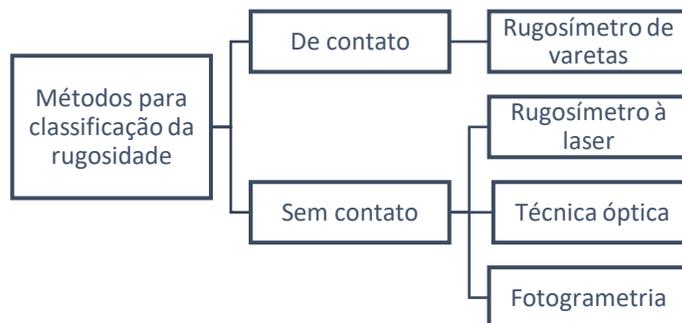
diminuiu mesmo em solos que permaneceram saturados, durante o evento de chuva simulada (HU et al., 2012), em vista disso, o encrostamento superficial foi o único fator responsável pela alteração na infiltração de água. Nos primeiros minutos de chuva, formou-se uma fina superfície vedada, e com o passar do tempo desenvolveu-se uma camada encrostada mais robusta, juntamente a isso, também foi observada diminuição da rugosidade superficial do solo.

3.3 Técnicas para caracterização da rugosidade do solo e presença de crosta

A caracterização da rugosidade e presença de crosta na superfície do solo pode ser feita com o emprego de diversos tipos de aparelhos, por meio de diferentes técnicas de leitura (GARCIA et al., 2010) que variam desde métodos de simples determinações manuais aos mais sofisticados que permitem a leitura do microrrelevo sem o contato físico entre o aparelho e a superfície do solo, ou métodos não invasivos. Dentro de cada método, também existe uma diversidade de técnicas empregadas.

Os métodos mais comuns para a obtenção da rugosidade superficial do solo são classificados como mecânicos e ópticos. Dentre os mecânicos, destacam-se métodos de contato, como o rugosímetro de varetas (MACHADO et al., 1996; CONTE et al., 2007; ROSA, 2007), e técnicas sem contato como o rugosímetro a laser (DE MARIA et al., 2003), técnica óptica (BARRETO, 2019; MCKENZIE et al., 2016) e fotogrametria (FONSTAD et al., 2013), ilustrado no esquema da Figura 1. Esses métodos de diferem quanto à precisão e à resolução obtidas, bem como aspectos práticos, como custos e capacidade de trabalho em campo.

Figura 1 Métodos mais comuns para caracterização da rugosidade superficial



Fonte: Do autor (2020)

3.3.1 Rugosímetro de varetas

Técnicas perfilométricas são relevantes para diversas aplicações industriais, biológicas, médicas e, no caso, da engenharia agrícola podem ainda ser empregadas na análise qualitativa do preparo do solo, descrevendo a rugosidade superficial ou microrrelevo do solo (LINO, 2002). Na agricultura, os aparelhos mais antigos e os mais empregados foram denominados de perfilômetros ou rugosímetros de varetas. Essa possibilidade de quantificar a rugosidade do solo a partir de medidas de microrrelevo foi proposta quase simultaneamente por Kiupers (1957) e Candura et al, (1957), permitindo realizar leituras manuais nos pontos de leituras. Um avanço importante que facilitou o uso dos rugosímetros de varetas para obtenção das alturas do microrrelevo em condições de campo foi o acoplamento de uma câmera fotográfica juntamente com o instrumento de medida para registrar a posição das hastes. Adiante, desenvolveram programas computacionais que permitiam recuperar os dados de altura a partir das fotografias escaneadas (WAGNER and YIMING YU, 1995) e fotografia digitais.

Os rugosímetros de varetas têm um emprego consagrado na determinação da rugosidade e na camada mobilizada do solo; porém, ocorrem distinções nos modelos conforme o interesse de aplicação, sendo que as maiores variações ocorrem nas dimensões, número e espaçamento entre as hastes. Para se obterem os valores das cotas, pode-se empregar hastes graduadas, registro gráfico em papel e fotografias das hastes (CARVALHO et al., 2007). O rugosímetro de varetas descrito na Figura 2 representa a estrutura construtiva mais comum dentre os modelos empregados atualmente para a determinação da rugosidade superficial, empregando o uso de fotografia das hastes. É importante salientar que esses aparelhos são de fácil construção, fácil transporte e manejo nos terrenos, tornando-se útil seu uso no campo. Eles também exigem simples manuseio e representam custos inferiores que as demais tecnologias. Em contrapartida, possui uma precisão muito baixa e, por serem de contato, destroem as amostras analisadas.

Almeida et al., (2016) avaliaram, sob chuva simulada, o efeito da cobertura vegetal sobre a erosão de um Argissolo Vermelho, no Estado de Mato Grosso do Sul, em diferentes sistemas de cultivo, utilizando um rugosímetro de varetas. Entretanto, concluíram que para os sistemas de solo exposto e cultivo convencional do solo, houve a formação da crosta superficial e a diminuição da rugosidade do solo, favorecendo o aumento das perdas de solo e água (Panachuki et al., 2010).

Figura 2 Perfilômetro de varetas



Fonte: Correa et al. (2012)

A redução da rugosidade superficial do solo foi analisada sob a ação de chuva simulada em diferentes sistemas de preparo do solo por Castro et al. (2006), que descrevem o emprego de um perfilômetro dotado de 100 varetas cujas leituras obtidas do perfil do solo foram empregadas para determinação do índice de rugosidade. Esses autores utilizaram o desvio-padrão dos valores das leituras das alturas das hastes do perfilômetro posicionadas no solo, eliminando valores que se posicionavam dentro da faixa de 10% tanto do limite superior quanto do limite inferior, concluindo que esse procedimento visou reduzir os erros causados por leituras erráticas.

A operação de leitura do rugosímetro de agulhas, assim como sua manipulação, modifica a superfície lida devido ao contato mecânico existente entre as agulhas e a superfície do solo. Portanto, esse instrumento não permite que outras leituras sejam realizadas posteriormente no mesmo local, somente leituras próximas umas das outras. Essa técnica apresenta vantagens como baixo custo, facilidade de transporte e de manejo de campo (BERTOL; GONZÁLEZ; VÁZQUEZ, 2007), mas apresenta desvantagens, como a grande interferência humana com o trabalho manual, a sensibilidade limitada à distância das varetas, além daquelas relacionadas a uma medição invasiva.

3.3.2 Rugosímetro a laser

Para evitar a deformação da superfície do solo promovida pelos aparelhos de contato, foram desenvolvidos dispositivos baseados principalmente em sensores óticos, que permitem efetuar medidas

pontuais ao longo de um transeco por meio de emissão de energia eletromagnética. Entre esses métodos, os mais empregados são os que utilizam luz infravermelha e raios laser, controlados por computador, possibilitando avaliações com melhor resolução que os métodos de contato. Os primeiros sensores óticos foram desenvolvidos por Harral and Cove (1982) e Römken et al., (1985). Nesses métodos, um feixe de raios infravermelhos ou de raios laser substitui a função de hastes, eliminando as possíveis perturbações físicas sobre a superfície do solo que podem ocorrer mascarando a real medida da microtopografia. Esses aparelhos emitem um feixe de energia eletromagnética, preferencialmente radiação infravermelha ou visível em forma de laser, no qual sofre reflexão na superfície do solo e retorna até uma lente fotossensível que absorve as ondas refletidas e assim estima a altura do microrrelevo do solo (DE MARIA et al., 2003).

Os rugosímetros a laser consistem em uma técnica não destrutiva, o que possibilita diversas leituras em um mesmo local. Para a leitura da superfície do solo, é utilizado um aparelho acoplado a um computador portátil para registro automático das leituras (DE MARIA et al., 2003). Esses equipamentos existentes diferem entre si, basicamente quanto ao sistema ótico de medida, na precisão e no número de perfis que se consegue medir. O primeiro estudo utilizando esses tipos de aparelho foi desenvolvido por Huang et al. (1988). Alguns modelos como os desenvolvidos por Römken et al., (1985) permitem realizar medidas apenas em uma única direção, dificultando a obtenção de vários perfis de altura, e conseqüentemente, a obtenção de vários perfis de altura em uma curta distância. Posteriormente, desenvolveram-se outros modelos que eliminavam esse problema e possibilitavam obter medidas de altura nas duas direções (x, y), com a mesma resolução. (FREDE e GÄTH, 1995).

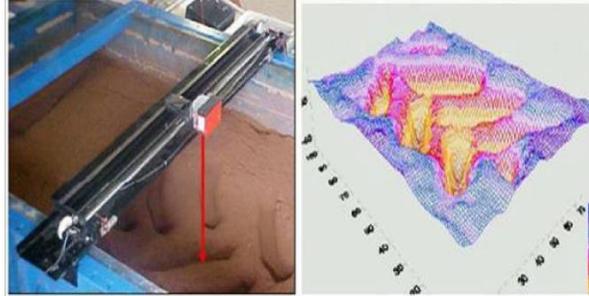
Martinez-Agirre et al., 2016 desenvolveram um rugosímetro a laser para caracterizar e quantificar a rugosidade superficial causada após diferentes operações de manejo no solo. Eles utilizaram um sensor a laser para medir a distância entre a barra de referência e a superfície conectado a um pequeno motor elétrico. Com esse estudo, eles contribuíram para o entendimento da rugosidade superficial em solos agricultáveis, porém destacam a importância demais pesquisas para caracterizar a dinâmica da rugosidade do solo.

Lanças (2007), ao analisar o efeito do rodado sobre a superfície preparada, em caixa de solo, empregou um rugosímetro a laser, mostrado na Figura 3, obtendo o perfil tridimensional superficial desse solo, para analisar os efeitos de compactação de diferentes tipos de pneus de borracha.

O rugosímetro a laser, se comparado ao rugosímetro de agulhas, apresenta melhor sensibilidade e precisão nos resultados, devido a altos números de medidas, o que melhora a estatística dos resultados. Por outro lado, esse apresenta custo mais elevado e é limitado ao uso de campo devido à interferência que sofre na presença da luz solar durante a leitura da rugosidade, o que provoca alterações significativas nos

resultados, e para minimizar o erro, descartam-se os dados obtidos nas extremidades (PAZ; TABOADA, 1996).

Figura 3 Rugosímetro a laser e respectivo perfil tridimensional da superfície do solo obtido



Fonte: Adaptado de Lanças (2007)

3.3.3 Estereofotogrametria

Outro método não invasivo, proveniente da técnica de fotogrametria, facilitou a obtenção de informações com maior precisão e rapidez, por meio de processamento computacional. Tal método consiste na reconstrução em 3D do modelo real da superfície para posterior obtenção dos índices de rugosidade. O principal atributo da técnica de fotogrametria é poder obter com informação tridimensional, através da restituição de diversas fotografias sobrepostas. Através das zonas de sobreposição, é possível determinar pontos comuns e em função da sua posição relativa com várias fotografias, criar modelos tridimensionais de superfície.

Desde o final da década de 80, as técnicas de fotogrametria são aplicadas para estudos do comportamento da rugosidade do solo (GASCUEL-ODOUX e BRUNEAU, 1990; HELMING et al., 1991; IVANOV et al., 1995). Esses autores destacaram a técnica como promissora, porém encontraram limitações com a estrutura e manuseio. Mais recentemente, a reconstrução 3D multivista surgiu de um novo método derivado da estereofotogrametria, o qual se baseia em um conjunto de fotografias sobrepostas tiradas por uma câmera digital de alta qualidade a partir de diferentes pontos de vista e processo para determinar, automaticamente, a geometria de cena e os parâmetros da câmera (GILLIOT et al 2017). Tal método consiste na reconstrução em 3D do modelo real da superfície do solo para posterior obtenção de índices de rugosidade. Favalli et al., (2012) desenvolveram uma abordagem fotogramétrica totalmente automática para medir a rugosidade da superfície do solo a partir de fotos tiradas em campo com uma câmera digital simples, sem restrições geométricas, diferenciando quatro níveis de preparo do solo.

O Teorema de Ullman, chamado de “Structure From Motion” – SfM (ULLMAN, 1979) e modificado por Butterfield (1997) mostra a estrutura tridimensional e o movimento de objetos rígidos podem ser inferidos das transformações bidimensionais de suas posições projetadas. Esse teorema demonstra a capacidade de recuperar a estrutura 3D de objetos de um conjunto de imagens. A reconstrução 3D completa a partir de um conjunto de imagens requer as três etapas seguintes: (i) localização dos pontos-chaves e descrição dos recursos; (ii) caracterização da correspondência entre as diferentes imagens; (iii) cálculos de pose da câmera e estrutura de cena. A saída principal dos algoritmos SfM é uma nuvem de pontos 3D em coordenadas relativas. Finalmente, é necessária uma última etapa de georreferenciação para obter localizações precisas. Os descritores de recurso precisam ser invariantes entre as imagens para o mesmo objeto para serem correspondidas. Essa técnica afirmou ser uma ferramenta válida e se tornou uma alternativa para medir a rugosidade superficial do solo nas mais diversas situações (DANDOIS e ELLIS, 2013; WOODGET et al., 2015; PIERMATTEI et al., 2015).

Westoby et al., (2012) descrevem uma técnica fotogramétrica SfM para a obtenção de conjuntos de dados de alta resolução em uma variedade de escalas, baseada no conhecimento dos parâmetros da cena com a aquisição das imagens deslocadas sobrepostas, a partir de uma câmera digital a nível do consumidor. Os autores comparam a técnica com um modelo similar obtido por um laser de varredura terrestre, e concluem que SfM representa um grande avanço no campo da fotogrametria para aplicações em geociências.

3.3.4 Trabalhos comparando diferentes métodos

Diversos são os estudos comparando os diferentes métodos para a caracterização da rugosidade superficial do solo, em busca, na maioria das vezes, do método com melhor precisão, baixo custo e facilidade de manuseio. A seguir, são apresentados diferentes estudos comparando as técnicas mais utilizadas para a caracterização da rugosidade.

Ao considerar que a rugosidade do solo permite avaliar, de forma indireta, a retenção de água nas microdepressões, Bertoni et al. (2000) utilizaram análises geoestatísticas para a determinação da sua variabilidade espacial. Empregaram para isso um perfilômetro de agulhas para condições de campo e outro, a laser, para superfície simulada, encontrando alta dependência espacial da rugosidade do solo nas duas condições avaliadas. Os autores ressaltam a limitação do rugosímetro a laser quando operado no campo devido à exposição à radiação solar que induziria a erros consideráveis. Já o rugosímetro de agulhas apresenta a limitação de interferir no microrelevo do solo, impedindo que mais de uma leitura seja feita no mesmo ponto, de modo confiável.

Jaster and Klik 2005 avaliaram a rugosidade superficial do solo após chuva simulada usando métodos de contato (rugosímetro de varetas e corrente de rolo) e métodos sem contato (fotogrametria e scanner laser) e observaram que os métodos sem contato apresentam resolução maior comparado aos métodos de contato, apesar de apresentarem um custo maior. Eles ainda observaram que o scanner laser utilizado reproduziu melhor os menores agregados e os espaços vazios entre eles, enquanto a fotogrametria representou melhor os maiores agregados.

Thomsen et al., 2015 utilizaram as técnicas tradicionais de contato (rugosímetro de varetas e corrente de rolo) e sem contato (estereofotogrametria e scanner laser), comparando à nova técnica de sensibilidade, a Xtion Pro, utilizadas em vídeo-games. Eles observaram que todos esses métodos analisados conseguem caracterizar a rugosidade do solo, e ressaltam que a escolha do método de medição para os dados de rugosidade é de extrema importância e depende da acurácia requerida, resolução do equipamento, mobilidade no campo e orçamento disponível.

3.4 Técnicas ópticas

No século passado, a humanidade experimentou vários avanços tecnológicos que continuam alterando nossas perspectivas, interações científicas e sociais. Com o desenvolvimento do LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), na metade do século passado, ampliou-se o uso da luz como ferramenta tecnológica. Dentro das possíveis atuações de técnicas ópticas, a área de ciência de solos tem atraído bastante atenção. A técnica óptica vem sendo uma ferramenta bastante útil e com grande potencial para aplicação na agricultura, pois não é destrutiva, não requer contato físico com o objeto a ser analisado e possui alta sensibilidade, sendo seu número de aplicações cada dia maior.

Ribeiro et al., (2013), Ozer et al., (2010) e Arrizaga et al., (2004) obtiveram os mesmos resultados propostos pelos métodos tradicionais, com menor tempo de análise, utilizando um menor tamanho de amostra, obtendo alta repetitividade, boa confiabilidade e gerando armazenamento dos dados em formato digital.

Yoshida e Hallett (2008) propuseram a técnica óptica para determinar o ângulo de abertura na ponta da trinca do solo, sendo esse um parâmetro promissor da fatura para produzir um crescimento estável de trincas no solo molhado.

McKenzie et al., (2016) utilizaram a técnica de Moiré de projeção com luz não estruturada e estruturada, para estudar as deformações causadas pelos pneus dos tratores agrícolas no solo, quando eles são operados a diferentes pressões. A técnica aplicada ao solo mostrou-se ampla e promissora ao se analisar

distribuição da pressão e de lastro, o galope e a patinação dos pneus do trator. Porém, a técnica apresentou limitações como disposição dos equipamentos e à luminosidade.

Barreto et al., (2019) desenvolvam uma técnica óptica de baixo custo, portátil, robusta e aplicável ao campo, disposta por um laser de linha, câmera fotográfica e devidos processamentos de imagens para caracterizar solos com a presença da crosta superficial e solos sem a presença da crosta, Figura 4. A técnica utiliza a ferramenta de semivariograma para essa distinção.

Figura 4 Arranjo experimental da técnica composto por uma câmera, laser de linha e um luxímetro



Fonte: Barreto et al., (2019)

Dos trabalhos descritos pode-se inferir que vários autores têm realizado trabalhos para comparar os diferentes métodos empregados para a caracterização da rugosidade superficial do solo, apontando vantagens e desvantagens entre os métodos aplicados.

3.5 Processamento de imagens digitais

A ciência da computação e a eletrônica tornaram possível a substituição da avaliação visual humana por meios automatizados, e com isso, tem provocado uma abundância de pesquisas nessa área. Ao longo desses anos, houve um aumento expressivo e um aperfeiçoamento com relação às pesquisas em análise visual de imagem (VIVAS, 2014).

Técnicas de processamento de imagens digitais vêm sendo amplamente utilizadas em várias investigações relacionadas à ciência do solo. Por exemplo, elas são utilizadas para estudar a variação de volume nos solos (ÖREN et al., 2006, GACHET et al., 2006, MESSERKLINGERr and SPRINGMAN, 2007), morfologia das trincas superficiais por secagem (LAKSHMIKANTHA et al., 2009, LI and ZHANG

2010), estimativa de modelos de elevação (JESTER and KLIK 2005, ZIELINSKI et al., 2012) e presença de crosta na superfície (BARRETO et al., 2019). Nesse contexto, técnicas recentes de medição baseadas no processamento de imagens mostra-se favoráveis para o estudo em questão.

Uma estimativa vertical pode ser obtida a partir de análises de imagem de apenas uma câmera, no entanto, uma falha é observada, pois pode ser obtido um número limitado de parâmetros. Essa limitação é ditada porque as imagens digitais achatam os objetos para um conjunto bidimensional de pixels, o que torna a terceira dimensão não visível ou com distorções. Esse problema pode ser superado com a utilização de duas ou mais câmeras digitais em ângulos diferentes, porém, o processamento dessas imagens precisa de uma rede mais complexa (ZIELINSKI et al., 2012, Sanchez et al., 2013). Para minimizar essa distorção gerada pela visão monocular de imagens digitais, Ribeiro 2020 desenvolve um sistema para corrigir os parâmetros de cena, chegando em resultado mais preciso.

3.6 Índice de rugosidade

A caracterização quantitativa do microrrelevo superficial apresenta um específico caráter subjetivo, sendo admissível a utilização dos índices quantitativos que proporcionam uma caracterização objetiva da superfície, contribuindo com informações de ampla utilidade da rugosidade. As variações do microrrelevo em decorrência das diferentes operações de preparo e do efeito das chuvas que ocorrem com o passar do tempo são comumente caracterizados por índices calculados a partir das medidas de altura da superfície do solo. A utilização desses índices proporciona uma caracterização objetiva da superfície do solo, contribuindo com informações que facilitam a escolha das práticas de preparo do solo mais adequadas a cada condição de exploração agrícola (BANDEIRA, 2019).

Os diversos índices de rugosidade existentes são obtidos com base nos dados de altura medidos com o auxílio dos equipamentos citados acima e buscam caracterizar as microdepressões do solo. Os primeiros índices de rugosidade propostos eram do âmbito estatístico (BURWELL e LARSON, 1969). Posteriormente foram desenvolvidos novos índices cuja proposta era justificada por possuir um significado físico (DEXTER, 1977). Em seguida, foi proposta a possibilidade de aplicar técnicas matemáticas avançadas para caracterizar a rugosidade superficial do solo (DARBOUX et al., 2002; VAZQUEZ et al., 2009)

3.7 Estudo de caso

O conhecimento da condição da rugosidade do solo é de extrema importância em diversos aspectos do solo e, também, em alguns tipos de compostagens, pois auxiliam na identificação do grau de

compactação, infiltração e escoamento. Sendo assim, é apresentado um estudo de caso teórico para erosão, *Compost Barn*, sistemas de cultivo convencional e plantio direto.

3.7.1 Erosão

A erosão é um processo natural de formação do relevo através da remição, transporte e redistribuição de partículas causados pela ação de água, do vento e das variações de temperatura (SPAROVEK, 1996). Nos solos cobertos por vegetação, a erosão é lenta e ocorre de maneira gradual, porém quando a camada é removida, o solo fica diretamente exposto à ação dos agentes erosivos e a erosão passa a ser precipitada, causando grandes modificações no relevo em um tempo reduzido.

A expansão das cidades, das áreas agrícolas e as áreas de pecuária sobre áreas de florestas aceleram o processo de erosão, expondo o solo aos agentes, destruindo características físicas e empobrecendo terras (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2005).

O processo erosivo ocorre em etapas e tem início com o desprendimento das partículas do solo (MORGAN, 1997). O impacto das gotas de chuva ou da irrigação em solo nu destrói os agregados de superfície, desprendendo partículas que ficam soltas na superfície do solo e propensas ao arraste. Outros fatores de remoção dessas partículas são o teor de umidade inicial do solo, declividade do terreno e intensidade do evento chuvoso (FOX, 2004). O transporte ocorre na fase subsequente à liberação das partículas e, em ambientes tropicais, é feito pela água. Quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração de água no solo, a água se acumulará em superfície nas microdepressões do solo. Com a continuidade das chuvas, as microdepressões ficam saturadas e passam a extravasar seu conteúdo, formando um fluxo de água superficial chamado escoamento superficial (DARBOUXET et al., 2001). A última etapa do processo erosivo é a deposição das partículas transportadas. Ela ocorre de maneira seletiva, sendo as partículas maiores e mais pesadas depositadas primeiro e as partículas finas e menores depositadas por último, conforme a enxurrada perde velocidade (MENTEN et al., 2001).

A condição de superfície do solo é representada pelo conjunto de microelevações e microdepressões superficiais que formam o microrrelevo superficial do solo e tem importante influência nas taxas de infiltração, geração de escoamento e erosão (AUZET et al., 1995). As partículas soltas pelo preparo do solo e pela chuva são transportadas e depositadas nas microdepressões do solo, causando uma modificação da microtopografia do terreno, transformando um terreno rugoso em uma superfície lisa. Dessa maneira, com a ocorrência das chuvas, temos a redução da rugosidade do solo, redução da capacidade de armazenamento

de água na superfície, a formação de escoamento superficial e o aumento das taxas de erosão (CASTILHO, 2010).

O controle da erosão hídrica é uma das principais medidas para conservação do solo e da água em uma sub-bacia hidrográfica, em sistemas de uso e manejo do solo de forma sustentável e no contexto da segurança do solo e alimentar, notadamente na agricultura de subsistência e/ou a familiar (PONTES et al., 2017). O monitoramento dos processos erosivos mostra-se de suma importância na compreensão de sua evolução, uma vez que nele são identificados os processos ainda ativos e mensurada sua velocidade de evolução e área de abrangência (MORAES, 2016). São diversas as técnicas aplicáveis à atividade de monitoramento, desde a topografia clássica, na qual realizam-se medidas diretamente sobre a área (DEL, RIO et al., 2007; SILVA FILHO e NEVES, 2011; SIQUEIRA et al., 2013), até a análise de documentos históricos (APPEANING ADDO et al., 2008), técnicas de modelagem fotogramétrica e de Sensoriamento Remoto (AMARO et al., 2014; GHOSH et al., 2015), sistemas de varredura a laser aerotransportados (SHRESTHA et al., 2005) e escâneres a laser terrestres.

3.7.2 *Compost Barn*

O *Compost Barn* é um sistema de confinamento alternativo para vacas leiteiras, em que os animais ficam soltos e podem caminhar livremente dentro do galpão, visando a melhorar o conforto e bem-estar animal e, conseqüentemente, os índices de produtividade do rebanho (DAMASCENO, 2012; BLACK et al., 2013), Figura 5. Para esse tipo de sistema ter sucesso, as instalações devem ser projetadas de maneira a se obter um bom manejo da cama sobreposta, local onde os animais ficam, saindo apenas para a ordenha.

Figura 5 Sistema *Compost Barn*



Fonte: Do autor (2020)

O manejo da cama é o ponto-chave para o sucesso do *Compost Barn*. O intuito do sistema é a compostagem da cama, preservando um ambiente seco e macio para as vacas. Nesse sistema, a cama normalmente é de maravalha, permanece no galpão em torno de um ano e, posteriormente, pode ser utilizada como adubo para agricultura (JANNI et al., 2007). As vacas compactam a cama ao caminhar e deitar e, dessa forma, reduzem a quantidade de espaço de ar livre para penetrar no material (KADER et al., 2007). Por essa razão, a revirada frequente é necessária e indispensável para que se tenha um bom processo e compostagem. Além disso, a revirada é importante para manter a superfície limpa (BARBERG et al., 2007).

A cama deve ser revolvida no mínimo duas vezes ao dia, entre 15 e 30 cm de profundidade. Esse revolvimento pode ser realizado com o auxílio de diferentes equipamentos, com subsoladores convencionais, enxadas rotativas ou equipamentos adaptados, Figura 6. A finalidade desse revolvimento é incorporar os dejetos ao material da cama e aerar a camada mais profunda, proporcionando atividade microbiana e, assim, promover a compostagem. Esse processo promove o aquecimento da camada inferior da cama e resulta na evaporação da umidade, o que proporciona, então, uma superfície macia e seca para o conforto dos animais. (SHANE et al., 2010).

Figura 6 Implemento utilizado para revolvimento da cama sobreposta composto por subsolador e enxada rotativa



Fonte: <https://www.gualat.com.br/?p=detalhar_produto&idproduto=2270> Acesso 22/12/2020

Janni et al. (2007) recomendam revolver a cama do *Compost Barn* entre 25 a 30 cm de profundidade. Barberg et al. (2007), por sua vez, recomendam que não revolver a uma profundidade suficiente tem várias

consequências, como exemplo, cria-se uma condição anaeróbica muito próxima da superfície, o que pode trazer riscos para os animais, principalmente em relação à mastite; e, pode haver uma redução na capacidade da cama em manter altas temperaturas, já que a camada estará muito superficial. O manejo e gerenciamento inadequados podem levar a condições muito indesejáveis da cama da compostagem, como vacas sujas, contagens de células somáticas elevadas e um maior risco de ocorrência de mastite clínica (Black et al., 2013).

Segundo Janni et al., (2007), os implementos utilizados no processo de revirada diária têm vantagens e desvantagens. O subsolador permite a agitação mais profunda (25 a 45 cm), o que promove camada de compostagem ativa mais logicamente profunda. Já a enxada rotativa, embora não consiga atingir camadas mais profundas (10,2 a 15,2 cm), promove uma quebra mais fina do material de superfície, facilitando a entrada de ar e uma maior superfície de contato para microrganismos agirem. Como ponto negativo, a utilização frequente do roto cultivador pode levar a uma maior compactação da superfície da cama. Dessa forma, não há uma regra de manejo dos implementos, sendo o aspecto físico da cama, o definidor do processo utilizado.

Ressalta-se que para um bom manejo da cama sobreposta, é necessário, a caracterização da sua superfície. Uma vez identificada sua rugosidade e presença de crosta, elas podem auxiliar no entendimento do processo de secagem do composto e, conseqüentemente, na escolha dos implementos adequados para o revolvimento da cama, deixando-a em condições desejáveis de compostagem.

3.7.3 Sistemas de cultivo

Com a remoção da cobertura vegetal para a exploração agrícola, o solo é exposto à ação direta do clima, e, quando submetido à intensa atividade de cultivo, há o impacto sobre os processos físicos, químicos e biológicos, modificando a qualidade do solo (PORTUGAL, et al., 2012). Os diferentes tipos de manejo provocam grandes alterações na densidade, porosidade e rugosidade superficial dos solos, conseqüentemente, na absorção e armazenamento de água, podendo interferir diretamente no desenvolvimento do sistema radicular e na produtividade final (PAIVA, 2011). Solos semelhantes, submetidos a diferentes usos e manejos, possivelmente apresentarão níveis de degradação diferentes, sendo o cultivo sob preparo do solo causador da maior degradação do solo, em relação ao manejo plantio direto (ASSIS; LANÇAS 2010).

No preparo primário, o solo normalmente é revolvido por um arado que inverte a camada superior (cerca de 20 cm) do solo para descompactar e criar uma superfície adequada. Esse processo consiste no revolvimento das camadas superficiais para reduzir a compactação do solo, incorporar corretivos e

fertilizantes, aumentar os espaços porosos e assim, elevar a permeabilidade e o armazenamento de água e de ar (SANTIGO; ROSSETO, 2007). Esse sistema de preparo auxilia no controle de pragas e patógenos que estão presente no solo, processo que facilita o crescimento das raízes das plantas. Porém, a utilização desse tipo de manejo por muitos anos pode proporcionar a destruição do solo, deixando-o mais susceptível à erosão, impedindo a formação dos processos mecânicos logo abaixo das camadas do solo movimentadas pelos equipamentos, o que prejudica diretamente o desenvolvimento radicular da cultura, proporcionando uma redução na produtividade (BAUDER et al., 1981).

O sistema de plantio direto surgiu em meados de 1980 sendo empregado principalmente em lavouras de grãos como soja, milho e trigo e apresenta grande capacidade de melhorar a produção agrícola, além de contribuir para minimizar os impactos dos sistemas agrícolas sobre o meio ambiente, pela redução da erosão do solo e da lixiviação (TOWUNSEND et al., 2016). O plantio direto é definido como um método de cultivo sem a inversão do solo, no qual as sementes são introduzidas diretamente no solo. A perturbação mínima do solo pela ausência de aração ou gradagem visa promover uma boa estrutura do solo e um melhor habitat para a biodiversidade benéfica do solo. Esse sistema foi desenvolvido como uma medida de conservação da água e do solo, mas posteriormente foi adaptado por vários agricultores para aumentar o conteúdo de matéria orgânica no solo e reduzir os custos de combustível e mão-de-obra, reduzindo o tempo necessário para as operações de campo (KASSAM et al., 2010). O plantio direto associado ao cultivo de plantas de cobertura e sua manutenção usando resíduos da colheita protege o solo do escoamento, diminui o fluxo de água, aumentando a infiltração e reduz o risco de erosão (SKAALSVEEN et al., 2019).

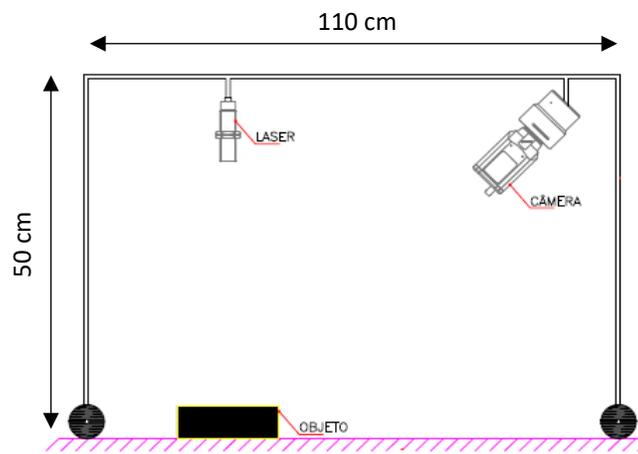
4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi dividido em duas etapas: uma para o desenvolvimento e calibração com testes realizados em laboratório, e a outra, aplicação em campo. A parte laboratorial foi realizada no Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária (CEDIA), localizado no Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, no qual foi realizado o desenvolvimento do equipamento envolvendo a calibração, sensibilidade da técnica e o desenvolvimento do processamento de imagens ideal para caracterização da rugosidade e crosta superficial. O equipamento desenvolvido teve duas aplicações em campo, uma para caracterização da rugosidade e crosta em uma área de pesquisa de erosão, localizada na Universidade Federal de Lavras, e a outra aplicada em área de *Compost Barn*, na fazenda Custodinho, no município de Perdões, produtora de gado de leite.

4.1 Desenvolvimento do equipamento

O equipamento desenvolvido partiu do pressuposto da utilização de uma configuração simples, composta por um laser de linha para iluminar a superfície do objeto e uma câmera para registro das imagens, como ilustra a Figura 7. O tamanho da estrutura, juntamente com as distâncias e ângulos dos instrumentos utilizados, foi ajustado com o objetivo de melhor obter a caracterização da superfície iluminada.

Figura 7 Configuração experimental básica desenvolvida



Fonte: Do autor (2020)

O arranjo foi composto por um laser de linha LASERLine modeloLGE20/532/c, com potência de 20 mW, comprimento de onda de 532 nm correspondendo a cor verde, conectado a uma fonte de energia LASERLine A.C. de 90/240v. Ao laser de linha foi acoplada uma lente cônica para uniformizar a luz projetada da linha. E para registro das imagens, foi utilizada uma webcam Microsoft LifeCam HD 3000 com resolução de 720p conectada a um computador. Para monitoramento da luminosidade, quando o equipamento foi utilizado em campo, o sistema foi acompanhado por um Luxímetro Digital escala de 0 a 999.900 Lux, com RS -232 e Datalogger Modelo LDR-225.

4.2 Calibração da técnica

A calibração da técnica foi realizada com objetos com dimensões conhecidas, conforme McKenzie et al., 2016 que, ao analisar a deformação do solo com a passada do pneu do trator, calibrou a técnica óptica de Moiré usando um objeto de madeira com as dimensões conhecidas. Li & Chen et al., (2012) também utilizaram objetos de dimensões conhecidas para calibrar um rugosímetro a laser e um scanner laser de luz estruturada ao avaliar a potencialidade desses equipamentos para análise de rugosidade do solo. Partindo desse pressuposto, foram utilizados um cubo da cor preta com as dimensões 5x5x5 cm; uma xícara com a base de 5 cm de diâmetro, altura 8 cm e altura da alça de 7,5cm; uma semiesfera com 15 cm de diâmetro e 8 cm de altura; e um cone com base de 5 cm de diâmetro e altura também de 5 cm, Figura 9, todos mensurados com o auxílio de uma régua. Conhecida a dimensão do objeto na imagem, em cm, fez-se uma relação entre essa dimensão e a quantidade de pixels. Nesse caso, 5 cm equivale a 108 pixels. Conhecendo todas as distâncias e ângulos entre os componentes câmera, laser e objeto, por dedução matemática, conseguiu-se encontrar os valores da altura do objeto. A partir da calibração, consegue-se aproximar as alturas desconhecidas dos objetos, na qual foi testado com uma placa de gesso, Figura 10, que simula a passada do pneu do trator no solo. Todos os objetos que serão utilizados na calibração serão cobertos com terra peneirada para simular a cobertura do solo.

Figura 8 Objetos utilizados para a calibração da técnica com alturas conhecidas cone $z = 5$ cm, semiesfera $z = 8$ cm, xícara $z = 8$ e cubo $z = 5$ cm



Fonte: Do autor (2020)

Figura 9 Placa de gesso para simulação da passada do pneu do trator

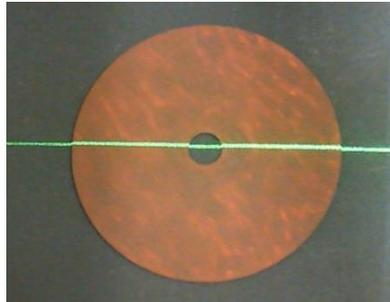


Fonte: Do autor (2010)

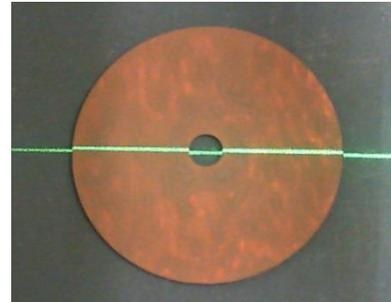
4.3 Sensibilidade da técnica

Para a observação da sensibilidade da técnica, foram utilizadas imagens de disco compactos a laser, popularmente conhecido como CD, pintados de marrom, cor do solo, sobrepostos em determinadas quantidades. Foram utilizadas imagens de um, dois, três e quatro CDs sobrepostos para testar a sensibilidade, como mostrado na Figura 11, mas vale ressaltar que a técnica consegue obter informações maiores que a metade da espessura da linha do laser, fato esse explicado pelo Teorema da Medida (HÖNIG et al., 1996) Após a aquisição das imagens, elas passaram pelo processamento de imagens com o objetivo de identificar variação de altura melhor representada. Para isso, foi utilizado a regressão linear múltipla para gerar um plano contendo os pontos da imagem de referência e identificadas e calculadas as alturas dos demais pontos.

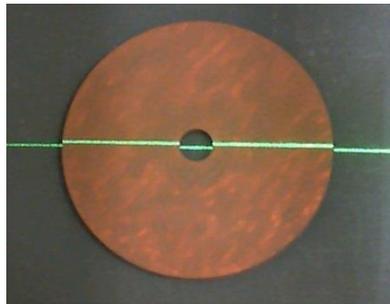
Figura 10 Iluminação de CDs para calibração da técnica (a) um CD, (b) dois CDs sobrepostos, (c) três CDs sobrepostos e (d) quatro CDs sobrepostos



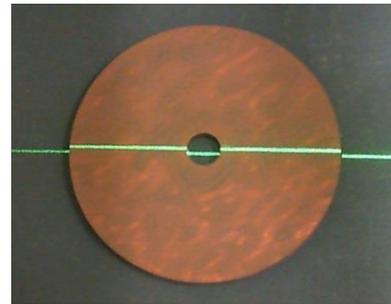
(a) Um CD



(b) Dois CDs sobrepostos



(c) Três CDs sobrepostos



(d) Quatro CDs sobrepostos

Fonte: Do autor (2020)

4.4 Identificação do perfil do objeto por meio de visão monocular

Para a identificação do perfil da superfície em análise por meio de luz estruturada e visão monocular, composta por uma fonte de luz como o laser de linha e uma câmera, todos os componentes precisaram estar dispostos em ângulos em relação à superfície. A técnica foi desenvolvida por Ribeiro (2020) em sua tese para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras.

Os raios de luz, partindo do laser, atingem a superfície plana utilizada como referência, Figura 12(a), e foram capturados pela câmera em uma única imagem, resultado do processamento da utilização da luz estruturada por meio da visão monocular. Em seguida, removeu-se esse plano de referência e, com o mesmo procedimento, capturou-se a imagem da superfície em análise, Figura 12(b).

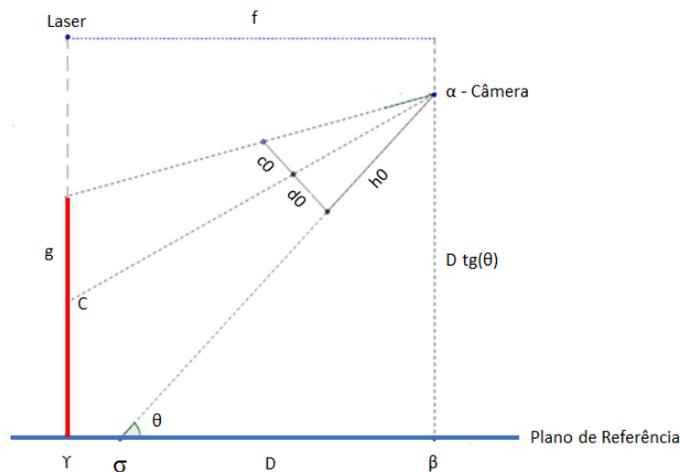
Figura 11 utilização do plano de referência (a) para identificação da variação da superfície (b) através de luz estruturada



Fonte: Do autor (2020)

Essas imagens foram necessárias para identificar parâmetros da configuração experimental. Dados alguns pontos estratégicos nessa configuração, como distâncias entre o laser, câmera, plano e superfície, foi medida manualmente cada variável e identificados os respectivos parâmetros que compõem o sistema, os quais foram identificados de forma manual e, conseqüentemente, seus dados são imprecisos. Para solucionar esse problema, foi utilizada uma função para corrigir os erros da geometria que compõe o sistema. Corrigida essa geometria com objetos de geometria conhecida e otimizando os parâmetros que compõe o sistema, conseguiu-se identificar perfis de geometria desconhecida. Cada variável do sistema foi composta por seus respectivos parâmetros, ilustrado na Figura 13.

Figura 12 Geometria da reconstrução do sistema por luz estruturada



Fonte: Do autor (2020)

Em que:

α = câmera

β = Ponto de interseção entre a linha perpendicular traçada desde o ponto α (câmera) até o plano de referência.

γ = Ponto de interseção entre a linha perpendicular traçada desde o projetor até o plano de referência.

σ = ponto do plano para o qual a câmera aponta.

Após cada ponto definido, é o momento de identificar cada variável:

Sendo:

g: Distância em centímetros entre projetor e o ponto γ

f: Distância em centímetro entre γ e β

D: Distância entre σ e β

θ : Ângulo formado pelos seguimentos $\sigma\alpha$ e $\sigma\beta$;

h_0 : Valor referente ao dado intrínseco da câmera;

C: Altura real do objeto;

c_0 : Altura relativa em pixels do objeto na imagem digitalizada na fotografia;

d_0 : Diferença em pixels entre o ponto central real da imagem até a linha horizontal projetada da imagem com o plano de referência e a superfície analisada.

4.4.1 Calculando a altura z

Para obter a altura z de um objeto de um valor c_0 extraído de uma imagem em 2D, foi utilizada a função $func_z(c_0; K)$, de acordo com as equações Equação 1 e Equação 2,

$$Z = func_z(c_0 K), \quad (1)$$

$$func_z(c_0; K) = \frac{D \operatorname{tg}(\theta) \left[1 + \operatorname{ctg} \left(\theta + \operatorname{atg} \left(\frac{h_0}{d_0 + c_0} \right) \right) \operatorname{ctg} \left(\theta - \operatorname{atg} \left(\frac{d_0}{h_0} \right) \right) \right]}{\left[1 + \operatorname{ctg} \left(\theta + \operatorname{atg} \left(\frac{h_0}{d_0 + c_0} \right) \right) * \left(\frac{D \operatorname{tg}(\theta) \operatorname{ctg} \left(\theta - \operatorname{atg} \left(\frac{d_0}{h_0} \right) \right) - f}{g} \right) \right]}, \quad (2)$$

Sendo $\mathbf{K} = [d_0, h_0, D, f, g]^T$ um vetor que contém os parâmetros que não modificam seu valor nas análises, pois pertencem à geometria do sistema implementado (setup). Assim, conhecendo o vetor \mathbf{K} , o

cálculo da altura z , mediante da função $func_z(c_0; \mathbf{K})$, depende unicamente da variável c_0 . Porém, o cálculo dos parâmetros em \mathbf{K} por meio das medições de alturas e ângulos é um trabalho complexo que traz muitos erros de medida. Portanto, para minimizar os erros, optou-se em realizar a seguinte aproximação da função $func_z(c_0; \mathbf{K})$, mediante da função $fp(c_0)$, Equação (3),

$$func_z(c_0; \mathbf{K}) = fp(c_0), \quad (3)$$

que representa uma série de Taylor, Equação (4),

$$fp(c_0) = p_0 + p_1 c_0 + p_2 c_0^2 + p_3 c_0^3 + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} p_i c_0^i \quad (4)$$

em que, o vetor $\mathbf{P} = [p_0, p_1, p_2, \dots]$ possui infinitos elementos. O parâmetro p_0 é o de mais fácil aproximação, pois se assume que $fp(0) \approx 0$, de modo que $p_0 \approx 0$ e,

$$fp(x) \equiv p_1 x + p_2 x^2 + p_3 x^3 + \dots \quad (5)$$

A partir de então, realiza-se uma aproximação considerando a geometria do sistema e testes para identificar o erro dessa aproximação. Finalmente, foi observado que um polinômio de primeira ordem ($p_i = 0 \forall i \geq 2$) já produzia uma aproximação adequada à altura real dos objetos, então agora

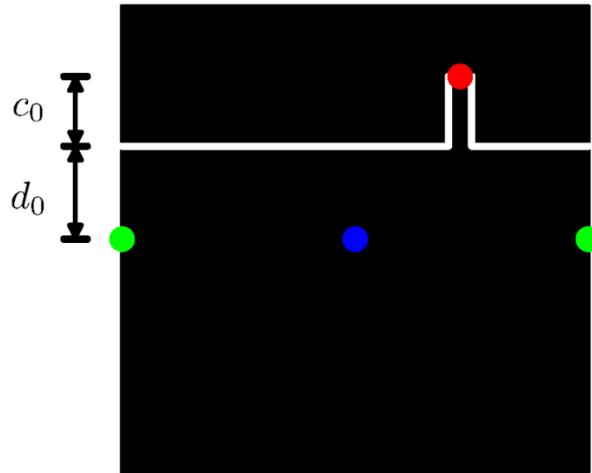
$$func_z(c_0; \mathbf{K}) \equiv fp(c_0) \approx p_1 c_0. \quad (6)$$

Assim, o único parâmetro desconhecido é p_1 .

É importante ressaltar que a aproximação utilizada foi apenas de primeira ordem, poderia ter escolhido outras com funções mais apuradas, entretanto, essa aproximação de primeira ordem já havia cumprido o objetivo.

Assim, usando a função $fp(c_0)$ pode-se achar a altura z a partir do valor c_0 em uma fotografia, como mostra a Figura 14. Nesse caso, vale ressaltar que c_0 é a medida da diferença de altura entre um objeto na fotografia e a linha de referência na posição d_0 .

Figura 13 Ilustração para a identificação da altura z do ponto



Fonte: Do autor (2020)

Por outro lado, para obter o valor p_l é usado um objeto de tamanho z conhecido, no qual tem-se uma fotografia e se obtém o valor de c_0 . Assim, para calcular o valor de p_l , utiliza-se a Equação (7).

$$p_l = \frac{z}{c_0} \quad (7)$$

4.5 Processamento das imagens

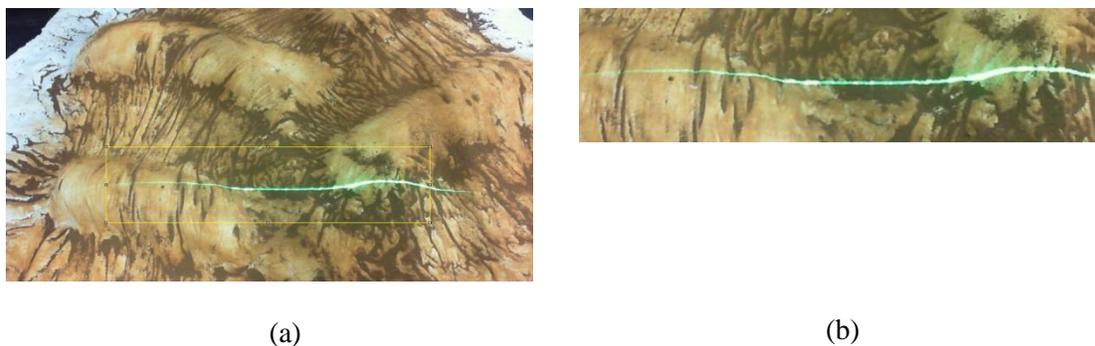
As imagens tiveram o mesmo pré-processamento proposto por Barreto et al., (2019) ao desenvolver uma técnica óptica para caracterização do solo quanto à presença de crosta. As imagens foram pré-processadas, nas quais passaram pelo processo de corte, sendo todas do mesmo tamanho, e, foram binarizadas. Após esse processo, as imagens tiveram processamentos específicos de acordo com a finalidade proposta, o que incluiu o processamento para a caracterização da crosta e o processamento para a análise de rugosidade do solo.

4.5.1 Pré-processamento das imagens

As imagens foram pré-processadas, individualmente, no programa ImageJ (RASBAND, 2004). Elas passaram pelo processo de corte, visto que todas terão o mesmo tamanho (780 x 198 pixels) e cortadas na mesma posição, buscando a centralização da imagem no eixo x, Figura 15. Essa centralização do corte busca

minimizar a distorção da imagem na extremidade, pois as câmeras tendem a essa distorção, sendo essa uma característica física da fotografia.

Figura 14 Imagem original da placa de gesso para (a) delimitação da área de corte das imagens e (b) corte da área delimitada

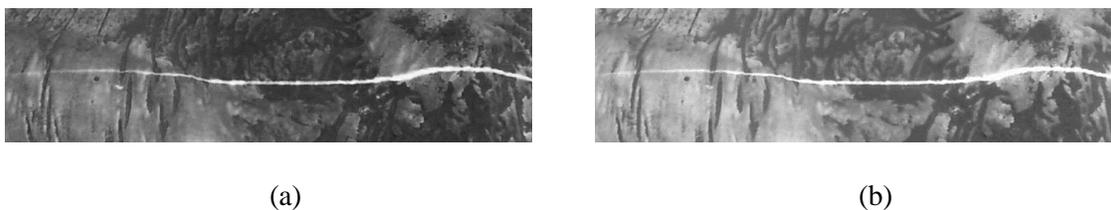


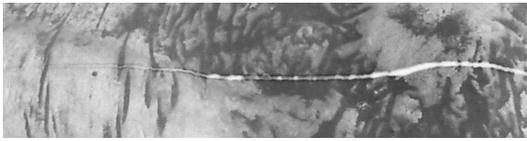
Fonte: Do Autor (2020)

Posteriormente, essas imagens foram decompostas em RGB, Figura 16, utilizando-se a decomposição em escala de *green* (FIGURA 16b), pois nessa escala e para esse setup se tem uma melhor nitidez do laser e das características para análise.

Após esse processo, foi realizada a binarização da imagem com a cor branca representada pelo número “255” e a cor preta por “0” e adequado ajuste de balanço de cores em níveis de cinza, um *Threshold* equivalente a 240, buscando visualizar apenas a linha do laser para posteriores análises específicas, Figura 17.

Figura 15 Decomposição da imagem em frequência de cores RGB (a) Red, (b) Green e (c) Blue.

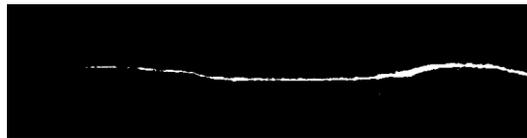




(c)

Fonte: Do Autor (2020)

Figura 16 Imagem binarizada

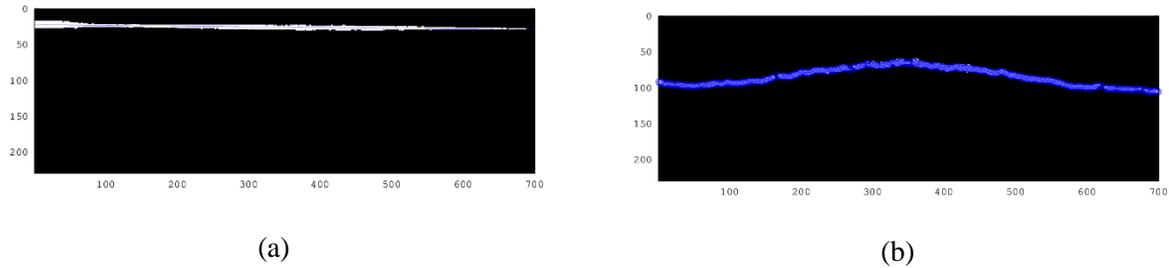


Fonte: Do Autor (2020)

4.5.2 Identificação das coordenadas x , y , z

O processamento de imagens foi realizado no programa Octave. A identificação das coordenadas x , y , z foi feita de acordo com o comando que está no ANEXO A, no qual são identificadas as coordenadas de cada ponto presente na linha de cada imagem. Primeiramente, o programa tem como entrada a imagem de referência e várias imagens da superfície em sequência, nas quais são aplicadas o mesmo procedimento, passando-as para tons de cinzas e, logo em seguida, tornando-as binárias, branco e preto, convertendo a imagem em uma linha e gerando uma nuvem de pontos para caracterizá-la. Para essa nuvem de pontos, é realizado um FITTING e SMOOTHING, que são ferramentas para suavizar os pontos, que eliminam os pontos considerados outliers, que são os dados isolados que atrapalham a identificação da curva. Ao final, tem-se a curva de referência, Figura 18a, e as curvas da superfície, Figura 18b, que são realizada a diferença entre cada uma das curvas da superfície e a referência para a criação de um conjunto de dados que representa a superfície em análise, em texto (.dat) em x , y , z . X representa a posição no eixo x (adimensional, para posterior calibração de acordo com o arranjo experimental), Y representa o número da linha que está sem análise e Z representa a altura do ponto (também adimensional para posterior calibração). Posteriormente, com os objetos de coordenadas conhecidas, fizeram-se as calibrações dos eixos com medidas dimensionais. O programa retorna dois tipos de dados, um arquivo completo com todas as informações, vários arquivos com as informações para cada linha da superfície em análise e a plotagem da identificação dos pontos e da superfície gerada.

Figura 17 (a) Imagem de referência e (b) identificação de cada ponto na curva

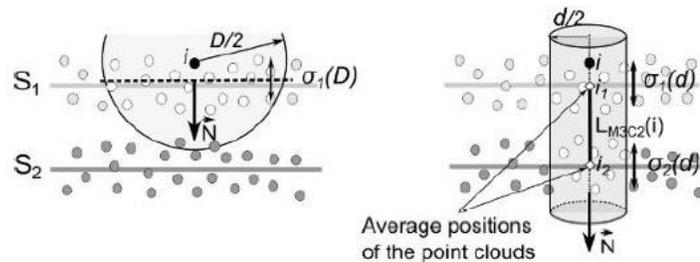


Fonte: Do Autor (2020)

4.5.3 Processamento de imagem para a caracterização da rugosidade

A caracterização da rugosidade superficial foi realizada seguindo o modelo proposto por Dewez et al (2016), utilizada também pelo programa CloudCompare. A ferramenta rugosidade desse programa é um algoritmo simples que calcula a distância entre um determinado ponto e o plano de melhor ajuste computado e seus vizinhos mais próximos dentro de um cilindro de raio r , a ser determinado (GIARDEU, 2019), como representado pela Figura 19. O algoritmo em ANEXO B descreve toda a identificação da rugosidade da amostra realizada, também no programa Octave, no qual a partir de um ponto identificado na nuvem gerada no item 4.5.2, cria-se um plano. Para descobrir quem são os vizinhos do ponto, escolhe-se um raio r e cria-se um cilindro ao redor desse ponto; sendo assim, todos os pontos contidos no cilindro são classificados como vizinhos no ponto em questão. A rugosidade é calculada como a distância vertical entre o plano do ponto em análise e cada um dos seus vizinhos. Esse cálculo é realizado para cada um dos pontos contidos na nuvem. Como saída do programa têm um índice de rugosidade média e um mapa de variação de rugosidade de todas as curvas analisadas.

Figura 18 Exemplificação para o cálculo da rugosidade pelo programa CloudCompare



Fonte: Giardeau (2019)

4.5.4 Processamento de imagens para caracterização da presença de crosta

Como proposto por Barreto et al (2019), a presença de crosta foi caracterizada pela ferramenta semivariograma (MCBRATNEY; WESTER, 1986). O semivariograma é uma ferramenta da Geoestatística que relaciona a semivariância com o valor dos incrementos de distância, como demonstra a Equação (8).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \frac{1}{N(h)} \sum_{N(h)} [z(x+h) - z(x)]^2 \quad (8)$$

Em que,

$N(h)$: número total de pares de amostras a uma distância (h)

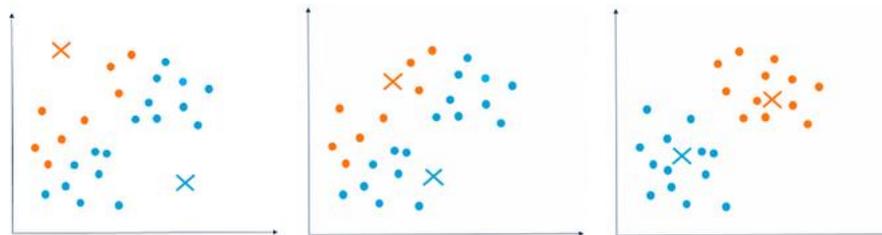
$Z(x)$: valor vertical na posição horizontal (x)

$Z(z+h)$: valor vertical na posição horizontal ($x+h$)

O cálculo do semivariograma também foi feito no programa Octave, descrito no comando do ANEXO C, no qual são importados os arquivos com as coordenadas X, Y, Z criado no item 5.4.2 de cada linha em análise. Primeiramente foi feita uma interpolação dos pontos para garantir que exista uma amostra por pixel, como medida de segurança. Para cada linha, foi obtido um semivariograma de acordo com a Equação 8. Adicionalmente com essas semivariogramas calculados, aplicou-se o algoritmo k-means.

O algoritmo k-means é um algoritmo iterativo que tenta particionar o conjunto de dados em k subgrupos (clusters) distintos e não sobrepostos pré-definidos, nos quais cada ponto pertença a apenas um grupo (JAIN, 2010). Essa técnica exploratória de dados mais comuns identifica subgrupos, por meio de centroides, de modo que os pontos de dados no mesmo subgrupo (cluster) sejam muito semelhantes de acordo com uma medida de similaridade, como a distância baseada e correlação, como ilustrado pela Figura 20, no qual o x representa a identificação dos centroides e, os pontos, os dados em análise.

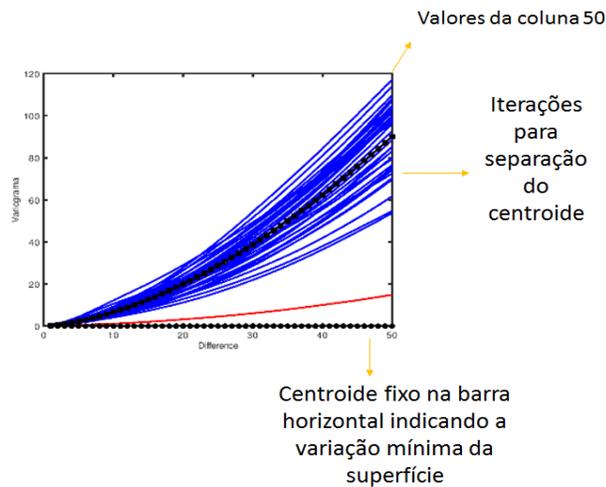
Figura 19 Exemplificação das iterações realizadas pela ferramenta k-means, identificando os diferentes centroides até que todos os dados pertençam aos mesmos grupos



Fonte: Do Autor (2020)

Para esse trabalho, o k-means foi utilizado para medir a distância entre as curvas, utilizando como critério de medição a área existente entre as curvas. Após a identificação dos diferentes centroides, com a finalidade de encontrar um valor numérico que caracterizasse o semivariograma das amostras, foi realizada a média dos valores de cada curva da coluna 50, como ilustrado pela Figura 21.

Figura 20 Exemplificação do semivariograma



Fonte: Do Autor (2020)

4.6 Aplicação prática do equipamento em uma área de erosão

O equipamento desenvolvido e testado em laboratório foi aplicado em uma área de erosão utilizada para pesquisa da Universidade Federal de Lavras, com coordenadas $21^{\circ}13'34''$ S e $44^{\circ}59'18''$ W, com 867 m de altitude. Essa área foi formada com solo retirado de determinada região para a construção da pista de atletismo da UFLA. Essa área de depósito é utilizada para pesquisa com erosão monitorada por pesquisadores do Departamento de Ciência do Solo da UFLA.

Foram analisadas 18 regiões diferentes dentro dessa área de erosão, especificamente demarcadas, como mostra a Figura 22. A cada região analisada, foram registradas imagens iluminadas com laser de linha a cada um cm na movimentação horizontal do sistema, até totalizar a variação do equipamento com comprimento de 40 cm. Então, para cada uma das 18 regiões diferentes, foram registradas 40 imagens para análise de rugosidade da erosão e presença de crosta. As regiões escolhidas possuíam valores de profundidades diferentes, que foram de variação nula até, aproximadamente, 50 cm. Para minimizar a intensidade dos raios solares, foi utilizado um sombrite, no qual o equipamento esteve disposto na sua

sombra. Com o objetivo de monitoramento da intensidade solar, foi utilizado um luxímetro digital, gravando-se o valor da intensidade solar, em lux, no momento em que a imagem foi registrada.

Figura 21 Delimitação das regiões de análise de erosão



Fonte: Do Autor (2019)

Para comparação dos resultados, a técnica utilizada foi comparada com a técnica Structure from Motion (SfM) a partir da geração de nuvens de pontos, que foi realizada em parceria com o Departamento de Ciência do Solo (DCS) da Universidade Federal de Lavras, o qual disponibilizou os dados processados da área. Para a realização dessa validação e aquisição das imagens, foi utilizado um veículo aéreo não tripulado VANT, DJI Phantom Profissional com uma câmera FC300X com 12 megapixels (4000 x 3000) Sony EXMOR 1/2.3. O voo foi realizado manualmente usando combinação de fotos ortogonais e oblíquas para fornecer geometrias de imagem convergente entre linhas (James et al., 2014), no mesmo dia da aquisição da técnica desenvolvida. A fim de reduzir a influência da luz direta do sol ao meio-dia, o voo foi realizado no final da tarde. A altura média de voo foi de 4 metros. Para o Georreferenciamento, foram instalados 12 pontos de controle ao redor das parcelas, Figura 23, e as coordenadas desses pontos foram estabelecidas pela estação total Geotetic GD2i e um mini-prisma, dentro de um Sistema de coordenadas local arbitrário.

A nuvem de pontos tridimensionais foi gerada a partir da técnica de fotogrametria SfM, que permite a reconstrução da topografia com base em imagens aleatoriamente distribuídas e orientadas de câmeras não calibradas (JAMES e ROBSON, 2012; FONSTAD et al., 2013; AGUERA-VEGA et al., 2018). As imagens foram processadas pelo software SfM comercialmente disponível Agisoft Metashape Professional® v1.5. E, para o cálculo do índice de rugosidade, foi utilizada a ferramenta rugosidade do programa CloudCompare, escolhendo-se o mesmo raio de análise que o da técnica desenvolvida nesse trabalho, como descrito na seção 4.5.3.

Figura 22 Pontos de controle para o Georreferenciamento da área



Fonte: Do Autor (2020)

4.7 Aplicação em campo do equipamento em uma área de *Compost Barn*

Para a aplicação do equipamento em *Compost Barn* para análise de rugosidade e presença de crosta do composto, foram iluminadas regiões antes e depois da atividade de descompactação desse composto, realizada diariamente. Duas vezes por dia, o gado confinado sai para ordenha sendo realizada a atividade de descompactação da cama sobreposta mediante determinado implemento agrícola, composto com um escarificador e uma enxada rotativa, acoplado a um trator.

A aquisição das imagens foi realizada no intervalo em que as vacas estavam em ordenha, antes e depois da atividade de descompactação do composto. Considerando toda a área como homogênea, serão iluminadas 18 regiões para análise de rugosidade e presença de crosta com o pisoteio dos animais e, conseqüentemente, a compactação da cama sobreposta. Para análise de rugosidade e presença de crosta após a passada do implemento, foram iluminadas 5 regiões descompactadas.

Similar ao processo descrito na área de erosão, o equipamento cobriu uma região de 40 cm, obtendo-se uma imagem a cada um centímetro, totalizando 40 imagens para cada região. E também foi registrada a intensidade de luz solar com o auxílio do luxímetro.

Para comparação dos resultados, nas mesmas regiões delimitadas anteriormente, foi utilizado um rugosímetro de varetas composto por 36 varetas espaçadas de 3 cm uma da outra. A base do rugosímetro foi composta por um trilho com 21 furos espaçados de 3 cm, de forma que o equipamento pudesse realizar a leitura de cada perfil ao longo do seu deslocamento na superfície analisada (CORREA et al., 2012). Para auxiliar a leitura das alturas das varetas, foi utilizada uma câmera digital Olympus VG-160 de 14 megapixels localizada em cima de um tripé de 54 cm de altura e a um metro de distância do rugosímetro. Atrás das varetas foi adicionado um papel milimétrico com o objetivo de auxiliar a leitura das varetas e, com o auxílio da ferramenta *measure* programa ImageJ, foi realizada a leitura das alturas das varetas em pixels e sua

transformação para centímetros no Excel. Na Figura 24 observa-se a aplicação do rugosímetro de varetas na mesma área analisada pelo equipamento desenvolvido.

Figura 23 Utilização do rugosímetro de varetas na área de *Compost Barn*



Fonte: Do Autor (2020)

4.8 Estatística dos dados

Para verificar estatisticamente a existência de correlação entre a técnica desenvolvida e as técnicas usadas como referências, foi utilizado, primeiramente, o teste de Shapiro Wilk (RAZALI et al., 2011), considerando como hipótese nula (H_0) em que os dados são provenientes de uma distribuição normal contra a hipótese alternativa (H_1), considerando que os dados não são provenientes de uma distribuição normal. A partir desse princípio, os testes de correlações escolhidos foram baseados na normalidade das variáveis. Então, quando houve normalidade em ambas as variáveis analisadas, ou seja, técnica desenvolvida e técnica de referência, usou-se o teste de correlação de Pearson (PEARSON, 1907); e, quando não existiu normalidade em uma das variáveis, utilizou-se o teste de correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904). Para ambos os testes, considerou como hipótese nula (H_0) a não associação entre as variáveis, ou seja, que não existia relação entre as variáveis, e, como hipótese alternativa (H_1), há existência de associação entre as variáveis.

Além disso, quando existiu o tamanho de amostra foi considerado pequeno, menor que seis observações, utilizou-se o teste de correlação de Kendall (KENDALL, 1938) diretamente para analisar a associação entre as variáveis, pois sabe-se que o teste de normalidade se torna pouco confiável nessa situação, comprometendo a validação das premissas. Toda a estatística foi calculada do programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

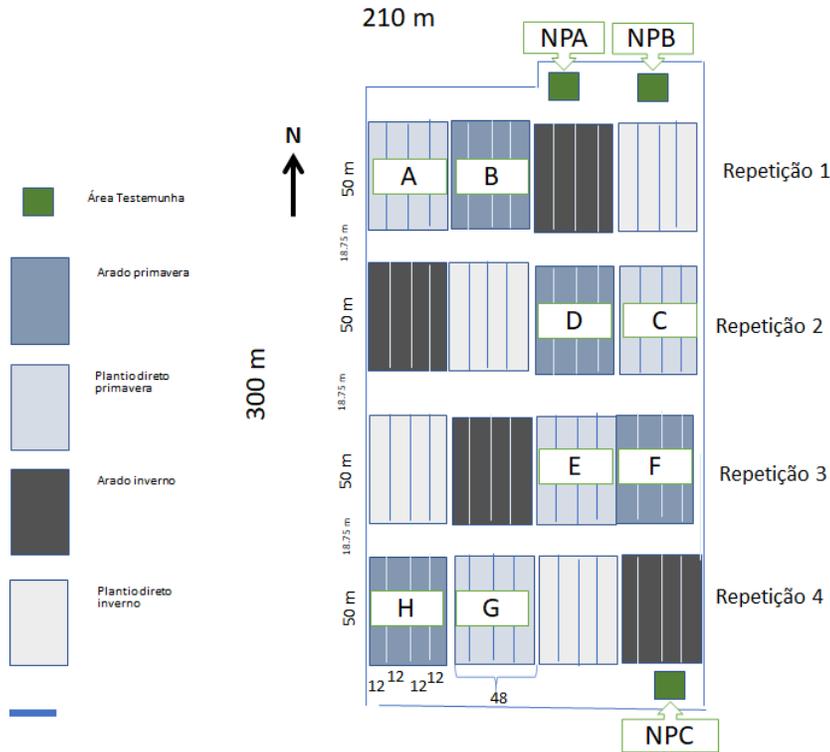
4.9 Aplicação Prática

A técnica óptica desenvolvida nessa tese na Universidade Federal de Lavras foi aplicada em outro local e com outros equipamentos. O setup foi construído no The James Hutton Institute, em Dundee, na Escócia, e teve o objetivo de acessar as características da rugosidade do solo, em 5 cm de profundidade, de uma área agricultável com diferentes manejos do solo. Para isso, foram analisadas amostras de solo de uma área arável e sistema de plantio direto das culturas de cevada e feijão, e também utilizada uma sem cultura e sem manejo como testemunha. As amostras foram retiradas do campo e analisadas em laboratório.

4.9.1 Retirada das amostras do solo

As amostras foram retiradas de uma área experimental pré-existente para avaliação das condições do solo para diferentes culturas e diferentes manejos do solo, localizada na fazenda experimental do The James Hutton Institute, no qual o delineamento experimental já possuía quatro repetições entre os tratamentos. Foram retiradas três amostras de cada repetição: feijão arado, feijão plantio direto, cevada arada, cevada plantio direto. Foram 12 amostras de cada tratamento, totalizando 60 amostras no total. Para a área testemunha, o delineamento experimental possui 3 repetições e também foram retiradas 3 amostras de cada repetição, totalizando 9 amostras. A Figura 25 ilustra a área experimental, no qual as áreas representadas pela cor verde (NPA, NPB e NPC) as testemunhas, sem uma cultura específica e sem manejo, e, em diferentes tons de azul, os diferentes tratamentos, identificados da letra A até a letra G. O azul claro representa a área plantio direto, enquanto o azul escuro, a área arada. Para esse experimento foram utilizados apenas as culturas semeadas na primavera, arado e plantio direto, assim, não foram utilizadas as demais áreas. O arado utilizado para o preparo do solo foi o convencional, ou seja, um arado de aiveca que inverte o solo a uma profundidade de aproximadamente 20 cm, enquanto o plantio direto semeou a semente em uma fenda com aproximadamente 2-3 cm de profundidade.

Figura 24 Delineamento experimental do teste da validação no qual as áreas em verde representam a testemunha, em três repetições NPA, NPB e NPC, enquanto as áreas em azul os diferentes tratamentos em quatro repetições identificados pelas letras de A até G. O azul



Fonte: Do Autor (2020)

Para a retirada das amostras de solo, foram utilizados dois cilindros de PVC de 5 de diâmetro com 5 cm de altura, ambos conectados por uma fita adesiva, totalizando uma amostra de 10 cm. Esse cilindro foi enterrado no solo com a ajuda de um martelo e a amostra foi retirada, cuidadosamente, para não ter alterações de estrutura, com o auxílio de uma pá. A Figura 29 apresenta a amostra de PVC enterrada no solo. Após esse procedimento, as mostras foram envoltas por plástico filme para serem utilizadas em laboratório.

No laboratório do Departamento de Solos do The James Hutton Institute, as amostras foram abertas e, ao retirar a fita adesiva que juntava as duas partes do cilindro, partiu-se a amostra ao meio, permitindo a acessar a rugosidade do solo em 5 cm de profundidade, como se verifica na Figura 27.

Figura 25 Forma cilíndrica enterrada no solo para extração da amostra sem deformação



Fonte: Do Autor (2020)

Figura 26 Amostra de solo partida ao meio para cessar a rugosidade em 5 cm de profundidade



Fonte: Do Autor (2020)

4.9.2 Construção do novo setup óptico

Com a disponibilização de todos os equipamentos necessários, foi construído um setup óptico para o escaneamento das amostras de solo e identificação quanto à presença de crosta e rugosidade. Foi utilizado um laser pontual da THORLABS modelo CPS532, 532 nm e potência 4,5 mW conectado a uma fonte de energia, e para transformar o feixe pontual em feixe de linha, foi instalada uma lente cilíndrica plano-côncava da THORLABS LJ4395RM nesse setup. O registro das imagens foi feito por uma Webcam Microsoft LifeCam HD 3000 conectada a um computador. Para maior precisão no escaneamento das amostras, foi utilizada uma mesa de coordenadas de translação de três eixos com o curso de 50 mm e um controlador de motor deslizante em tubo, ambos conectados a um cerco controlador CC, todos equipamentos da THORLABS. Na Figura 28 observa-se o setup óptico construído.

Figura 27 Setup óptico



Fonte: Do Autor (2020)

4.9.3 Iluminação das amostras

As amostras de solo foram escaneadas pelo equipamento desenvolvido no laboratório de processamento de imagens do The James Hutton Institute. As imagens registradas pela Webcam foram programadas para serem salvas a cada um segundo, enquanto a mesa de coordenadas de translação fazia seu movimento com velocidade de 1 mm/s, totalizando uma sequência de foto com 50 imagens e completando o escaneamento total da superfície da amostra. Como a amostra de solo possui seção circular, as imagens das extremidades foram descartadas, sendo essas as 15 primeiras e as 15 últimas. No caso, foram utilizadas 20 imagens, uma em cada um mm, totalizando 20 mm de escaneamento para cada amostra de solo, ilustrado na Figura 29.

Figura 28 Região de interesse da amostra de solo

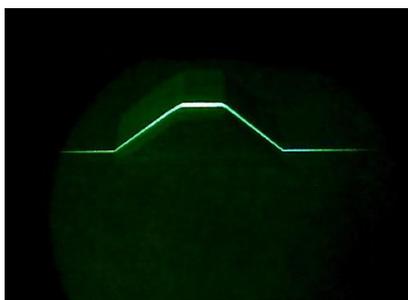


Fonte: Do Autor (2020)

4.9.4 Calibração do setup

Para a calibração desse setup, como descrito na seção 4.2, também foi utilizado um objeto de coordenadas conhecidas, sendo esse um trapézio de madeira com dimensões equivalentes à 4,5 de base maior, 1,0 de base menor e 1,8 de altura. Na Figura 30 pode-se ver a imagem original desse objeto de calibração.

Figura 29 Trapézio de coordenadas conhecidas para calibração da técnica



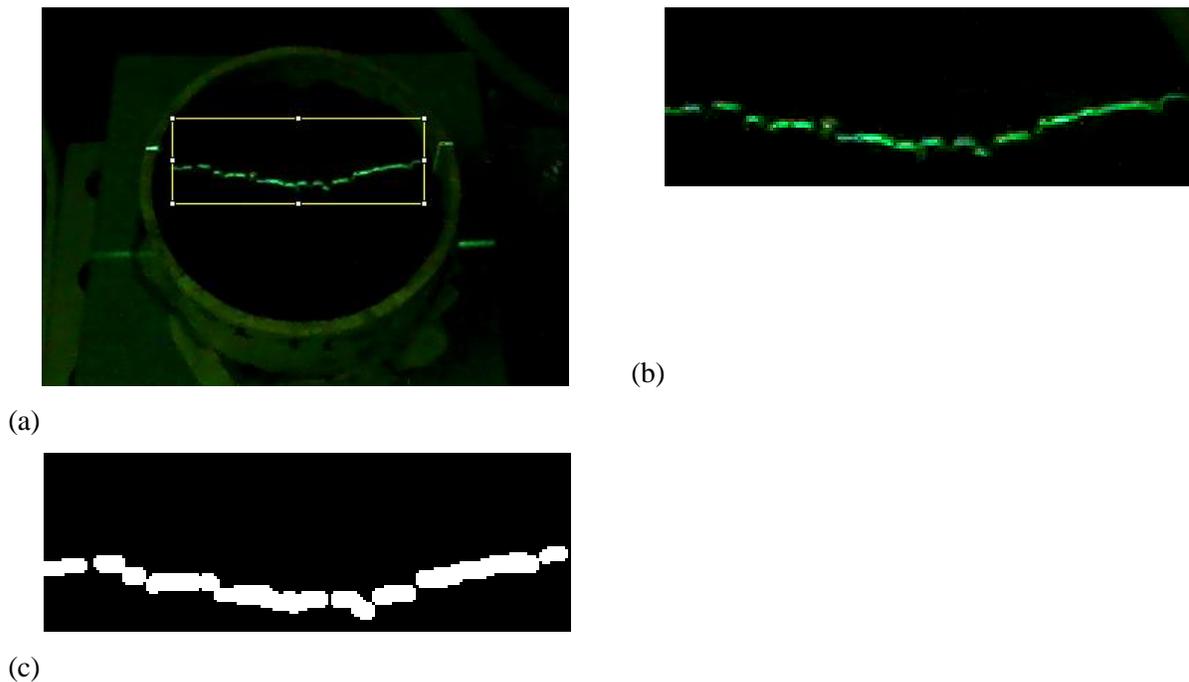
Fonte: Do Autor (2020)

4.9.5 Processamento de imagens

Também utilizando a metodologia proposta por Barreto et al (2019), as imagens foram processadas no programa ImageJ (RASBAND, 2004), as quais passaram pelo processo de corte, todas na mesma posição e obtendo o mesmo tamanho (167x60 pixels), ilustrado na Figura 31 (a) mostrando a área delimitada para corte dentro da imagem original e Figura 31 (b), com a imagem já cortada. Posteriormente, essas imagens

foram decompostas em RGB, no qual foi utilizada a decomposição em escala de “Green”, sendo que para essa escala e para esse setup, se tem uma melhor nitidez do laser e das características analisadas. Em seguida, realizou-se o processo de binarização da imagem com a cor branca representada pelo número “255” e a cor preta por “0” e adequado ajuste de balanço de cores em níveis de cinza, um Threshold equivalente a 240, buscando visualizar apenas a linha do laser, Figura 31 (c).

Figura 30 Processamento de imagens (a) área delimitada de corte dentro da imagem original, (b) imagem cortada e (c) imagem binarizada



Fonte: Do Autor (2020)

Os processamentos de imagem para a caracterização da rugosidade superficial e indicação de presença de crosta utilizados foram os mesmos descritos na seção 4.5, presentes nos Anexo A, Anexo B e Anexo C.

4.9.6 Análise Estatística

Para verificar estatisticamente se houve variação significativa entre as médias dos tratamentos cultura (feijão e cevada) e manejo (plantio direto e arado) com área testemunha, foi utilizada uma análise de variância ANOVA com o teste F de Fisher- Snedecor (FISHER, 1935), considerando como hipótese nula (H0) que não existe diferença entre as médias dos tratamentos, e hipótese alternativa (H1) que há diferença.

Como a área testemunha possui apenas um tratamento de manejo, não foi possível usar apenas uma ANOVA simples.

Sendo assim, os dados foram transformados em log para bordar uma inclinação positiva consistente nas medições de rugosidade média e semivariograma. Uma ANOVA unilateral, no qual o fator explicativo foi a interação entre o manejo e os tratamentos da cultura, foi usada para avaliar o impacto da cultura em oposição à área testemunha sem nenhuma cultura específica e tratamento. Os resíduos foram verificados quanto a possíveis padrões da estrutura experimental linha/coluna.

Os dados então foram restritos às parcelas cultivadas e uma nova ANOVA bidirecional foi realizada para separar os efeitos da cultura e do manejo. Especificamente, houve dois efeitos fixos: manejo e cultura e estrutura experimental, contabilizando um termo de bloqueio para linha. Os resíduos foram plotados para garantir que não houvesse um padrão visível por coluna. A estatística foi calculada do programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Arranjo experimental

O equipamento foi composto por um laser de linha e uma webcam, para iluminação e aquisição dos dados, que foram fixados na corredeira de trilho distanciados 15 cm um do outro. Tanto a câmera quanto o laser foram fixos ao trilho por suportes articulado que permitiu pequenos ajustes antes da aquisição dos dados. O laser formou um ângulo de 90° com a superfície analisada e estava a uma altura de 39 cm dela e conectado a uma fonte de energia. Já a câmera formou um ângulo de aproximadamente 45° com a superfície e estava a 29 cm da mesma. Sendo o suporte da câmera articulado, ele permitiu pequenos ajustes na sua angulação para obter a melhor projeção da linha laser. Mas vale ressaltar que essa variação de ângulo só é possível antes da aquisição dos dados, uma vez que se o ângulo ideal for encontrado, ele deve ser mantido até o final das aquisições. O laser e a Câmera foram movimentados em conjunto, o que manteve constante os ângulos e distâncias após os ajustes necessários. Para controlar o movimento horizontal do eixo na barra, foi fixada uma fita métrica auxiliando no descolamento do conjunto. O equipamento fez uma varredura de 40 cm de comprimento e 20 cm de largura. A Figura 31 mostra esse protótipo.

Figura 31 Protótipo do equipamento



Fonte: Do autor (2020)

5.2 Calibração da técnica de medição da rugosidade

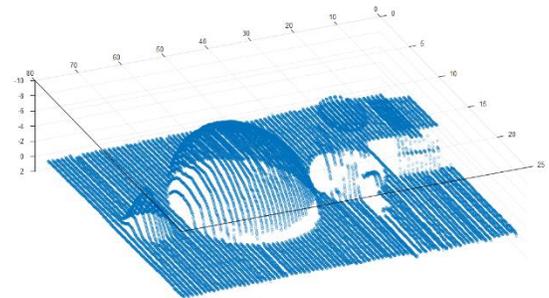
Os objetos utilizados para a calibração, como descritos na seção 4.2 foram um cone de gesso, uma semiesfera de isopor, uma xícara de plástico e um cubo de madeira, Figura 30(a). Os objetos que eram de cor clara foram pintados de marrom para tentar minimizar a refletância com a incidência do laser, sendo assim, o cone, a semiesfera e o cubo foram pintados. Já a xícara, era na cor vinho.

Esses objetos de dimensões conhecidas serviram para a identificação das coordenadas com a relação da quantidade de pixel pertencente a cada centímetro da imagem. Para os eixos x e y, foram utilizados a ferramenta “measurement” do programa ImageJ para a realização da relação entre centímetros e pixels dos objetos. Sabendo-se que a coordenada x do cubo possui dimensão de 5 cm, medindo-se essa distância em pixel, permitindo então essa relação. Do mesmo modo, foi calculado para o eixo z. Já o eixo y, foi a distância entre cada linha do laser adquirido na aquisição das imagens, sendo auxiliada pela fita métrica localizada na parte superior do protótipo, ilustrado pela Figura 8. Então, o fator de correção para a calibração dos eixos utilizados foram os seguintes: eixo “x” 150 pixels para 5 cm, eixo “y” uma imagem a cada 1 cm de distância e eixo “z” 60 pixels para 6 cm. Esse fator de correção foi utilizado no algoritmo que está no Anexo B. A Figura 32 mostra os objetos utilizados e a plotagem da identificação dos seus eixos, em (a) objetos de coordenadas conhecidas, (b) a identificação dos eixos de cada ponto processado pelo programa e (c) a plotagem 3D da superfície.

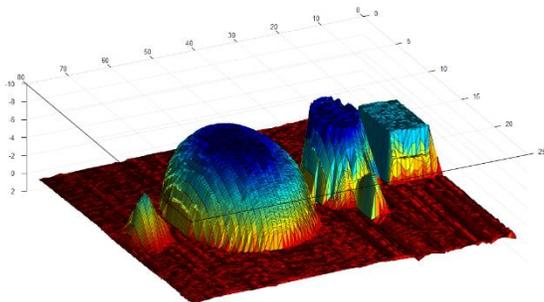
Figura 31 (a) Objetos de coordenadas conhecidas para a calibração da técnica (b) identificação dos pontos (c) plotagem 3D da superfície



(a)



(b)



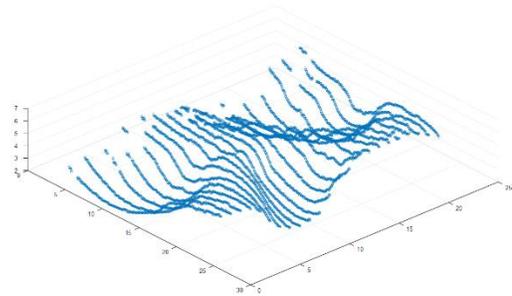
(c)

Realizada a calibração com objetos de coordenadas conhecidas, foi utilizada uma placa de gesso que simula a passada do pneu do trator no solo. A placa foi coberta com uma fina camada de solo na superfície, para melhor simular a superfície real do solo e diminuir a refletância da cor branca do gesso. O arranjo experimental, uma vez calibrado com objetos conhecidos, o fator de correção se torna o mesmo. A Figura 33 ilustra a calibração com as coordenadas desconhecidas, em (a) a placa de gesso utilizada com a simulação da passagem do pneu do trator, (b) a identificação dos eixos de cada ponto processado pelo programa e (c) a plotagem 3D da superfície.

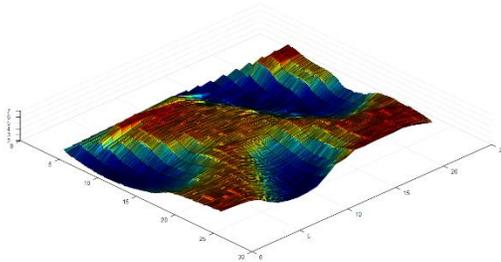
Figura 32 (a) Placa de gesso simulando a passada do pneu do trator, (b) identificação dos pontos e (c) plotagem 3D da superfície



(a)



(b)



(c)

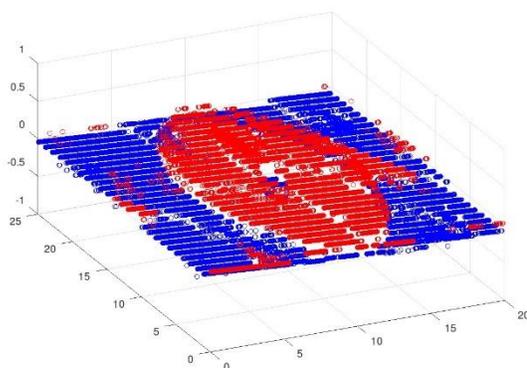
Fonte: Do Autor (2020)

5.3 Sensibilidade da técnica

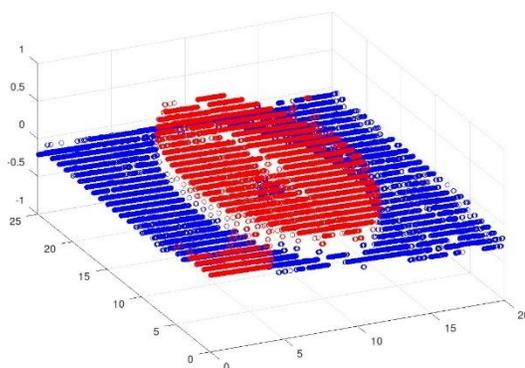
Para observar a verificação da sensibilidade da técnica de identificação do objeto por visão monocular através de luz estruturada, foram utilizados CDs empilhados de 1,5 milímetro de altura cada um. O algoritmo diferenciou os pontos da seguinte maneira: pontos pertencentes ao plano gerado, plano de

referência, foram coloridos de azul; enquanto os pontos que estavam fora desse plano, coloridos de vermelho. A Figura 34 mostra a plotagem da identificação dos pontos de cada linha processada, sendo a Figura 34 (a) para um CD, a (b) para dois CD's, a (c) para Três CD's e a (d) para quatro CD's. Conforme se pode identificar na Figura 34, a técnica consegue identificar a altura de um CD, equivalente a 1,5 mm, entretanto, a imagem apresenta ruídos que dificultam a separação desses pontos, sendo assim a mistura das cores. Portanto, a altura de dois CD's, equivalente a 3 mm, os pontos ficaram mais bem identificados.

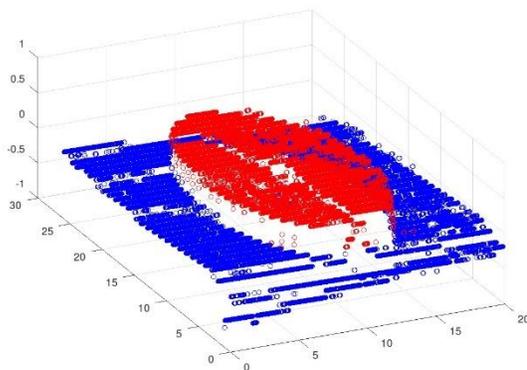
Figura 33 Utilização de discos compactos a laser, CD, para verificação da sensibilidade da técnica (a) altura de um CD, (b) altura de dois CD's, (c) altura de três CD's e (d) altura de quatro CD's



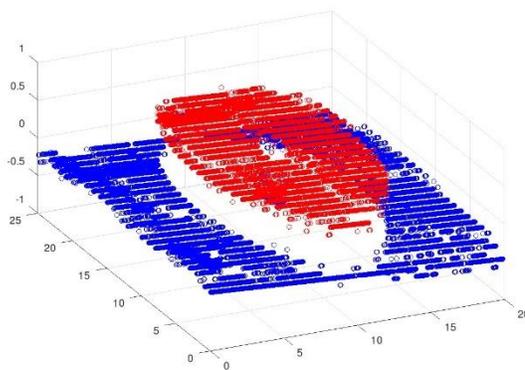
(a)



(b)



(c)



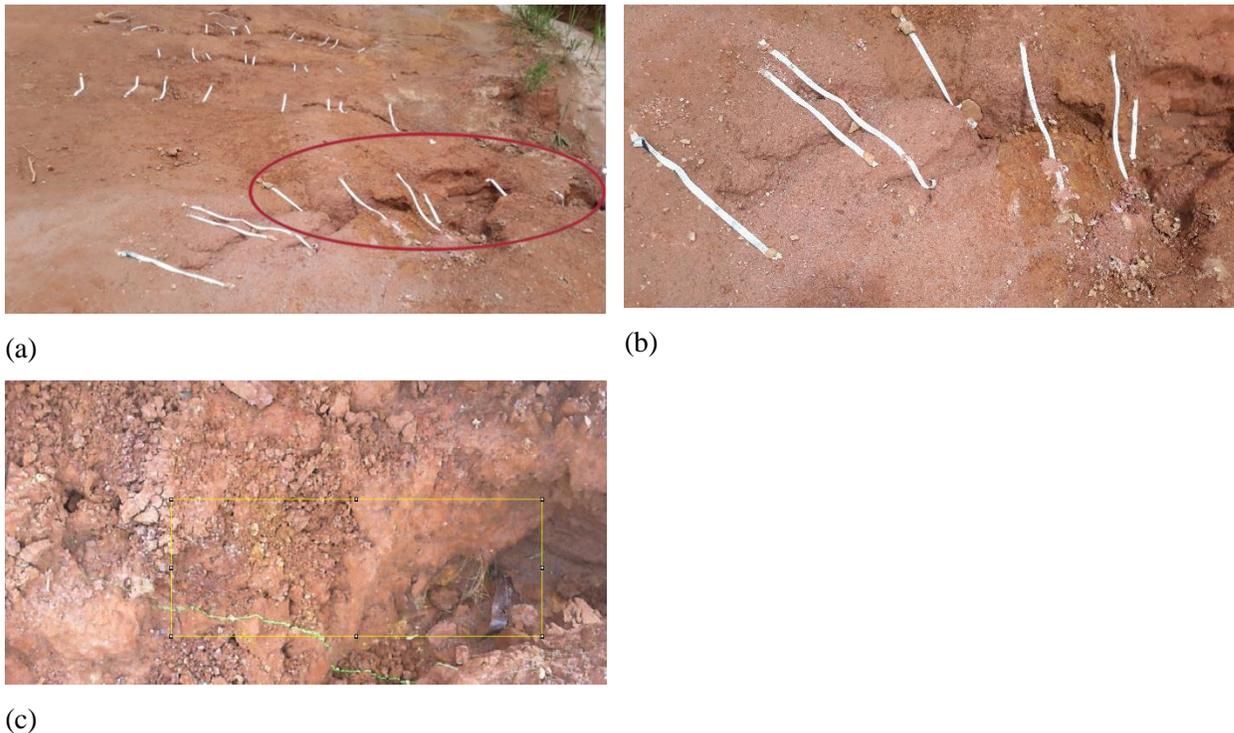
(d)

Fonte: Do Autor (2020)

5.4 Aplicação para área de erosão

Na aplicação da área de erosão, foram iluminadas 18 áreas amostrais. Dessas, três tiveram que ser descartadas antes do processamento devido à grande variação de profundidade da erosão, variação em torno de 50 cm, contados a partir da base do equipamento. Essa variação permitiu que o arranjo experimental fosse alterado, aumentando as distâncias da superfície do solo com o laser e a câmera, prejudicando assim a identificação nítida da linha do laser e o corte da imagem para processamento. A Figura 35 ilustra essa falha da técnica, no qual (a) compara essas regiões de grande variação da profundidade com as demais demarcadas, (b) vista superior dessas regiões e (c) mostra como essa mudança no arranjo experimental atrapalha o corte da imagem, indicando que o laser não está contido na área delimitada utilizada para todas as imagens, e que o laser não apresenta boa nitidez.

Figura 34 Área de erosão com grande variação de profundidade em (a) comparação com as demais áreas, (b) vista superior dessas áreas demarcadas e (c) indicação da área demarcada para o corte do processamento de imagens

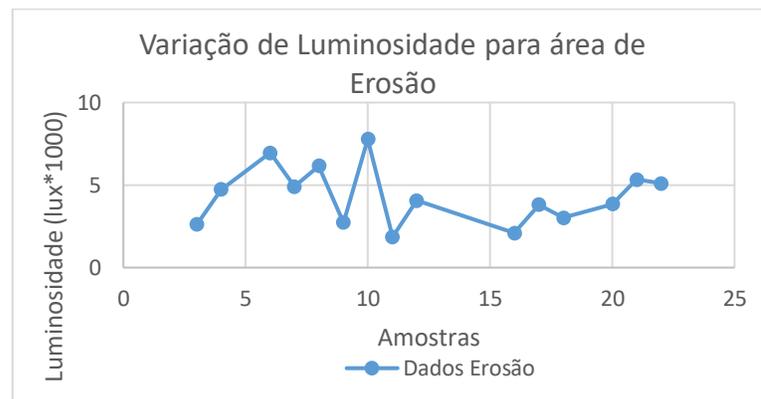


Fonte: Do Autor (2019)

Com o auxílio de um luxímetro digital RS -232 e Datalogger Modelo LDR-225, foi realizado o monitoramento da intensidade solar no momento em que cada imagem foi registrada, dentro de cada área amostral. A aquisição dos dados foi realizada das 7 horas da manhã até as 14 horas, apresentando vários

picos na intensidade da luminosidade do ambiente. O Gráfico 1 mostra a média da intensidade de luminosidade, em lux, em cada área amostrada. Como se observa no gráfico, mesmo usando um sombrite para minimizar os efeitos da luminosidade durante o experimento, obteve-se uma alta variação na intensidade de luminosidade, sendo essa uma variável de difícil controle quando se trabalha em campo. Essa variação de luminosidade foi um dos contribuintes para a aparição de interferências no processamento de imagens, sendo necessária uma modificação para limpeza da imagem a melhor visualização da linha do laser. Vale ressaltar que essa variação da luminosidade não interferiu no resultado final da rugosidade, apenas foi necessária a realização de uma modificação no processamento das imagens, mostrando que a técnica pode ser aplicada a campo.

Gráfico 1: Variação da Luminosidade durante a realização do experimento



Fonte: Do Autor (2020)

5.4.1 Pré-processamento de imagens

Devido às variações incontroláveis presentes no campo como variação da intensidade solar, variação de cores na superfície, presença de impurezas, como gravetos, folhas, restos vegetais, pedras de diversos tamanhos e cores, foi preciso alterar a imagem “Green” proveniente da decomposição em RGB proposta por Barreto et al (2019). Então, para limpar essas interferências na superfície, foi utilizada a ferramenta de decomposição “RGB to cielab”, também do ImageJ. A Figura 36 ilustra essa limpeza das imagens utilizando a outra decomposição em (a) imagem original, (b) cor “green” da decomposição em RGB e (c) a decomposição em RGB to cielab. Contudo, o pré-processamento das imagens foi corte de 700x230 pixels, seguido pela decomposição em RGB to cielab e Threshold.

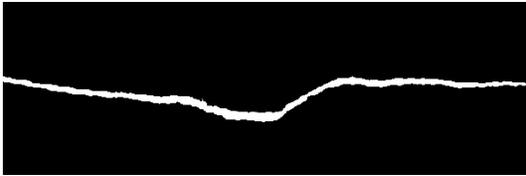
Figura 35 Processamento de imagens para a área de erosão (a) imagem original, (b) cor “green” da decomposição em RGB e (c) decomposição em RGB to cielab



(a)



(b)



(c)

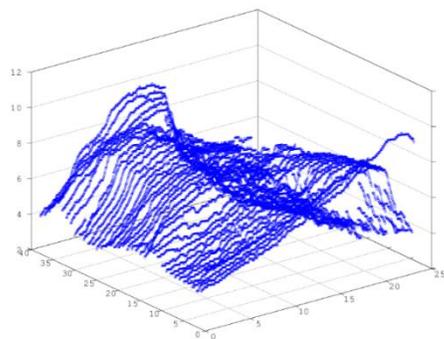
Fonte: Do Autor (2019)

5.4.2 Caracterização da rugosidade

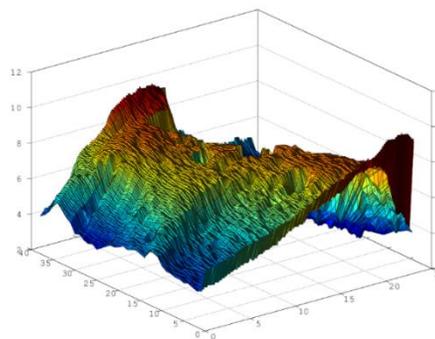
A rugosidade foi caracterizada como descrito na seção 4.5. Como resposta ao algoritmo usado para identificação dos eixos (ANEXO A), obtiveram-se arquivos de textos contendo os valores das coordenadas de cada ponto, sendo a coordenada “x” a posição no eixo X, a coordenada “y” a posição de cada imagem processada e a coordenada “z” a altura do ponto, uma figura ilustrando a identificação das coordenadas e plotagem 3D da superfície. A Figura 37 ilustra toda a resposta do processamento para uma determinada área da erosão, sendo em (a) A identificação das coordenadas de cada ponto analisado e em (b) a plotagem 3D da superfície.

O cálculo da rugosidade média foi o mesmo proposto por Giardeu et al (2019), o qual considera a rugosidade de um ponto como a distância entre um plano de melhor ajuste contido nesse ponto e seus vizinhos mais próximos dentro de um cilindro de raio “r”. Para o cálculo da rugosidade da área de erosão, o raio utilizado foi de 1,5 cm. Como resposta, obteve-se essa diferença de altura entre os pontos, caracterizando a rugosidade. A Figura 37 (c) identifica a variação de rugosidade em cada ponto da área amostrada e (d) o gráfico 3D dessa variação da superfície.

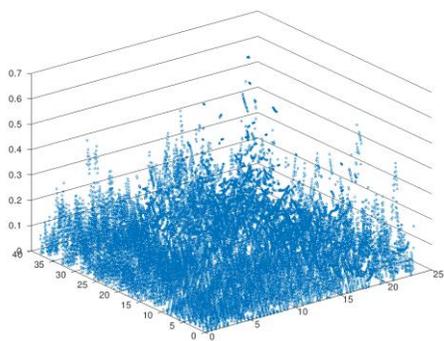
Figura 36 Variação da rugosidade para amostra de erosão (a) identificação das coordenadas x, y, z de cada ponto, (b) plotagem 3D da superfície, (c) identificação dos pontos calculado da variação da rugosidade, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade, (e) semivariograma



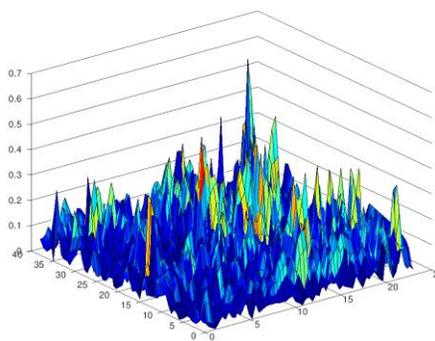
(a)



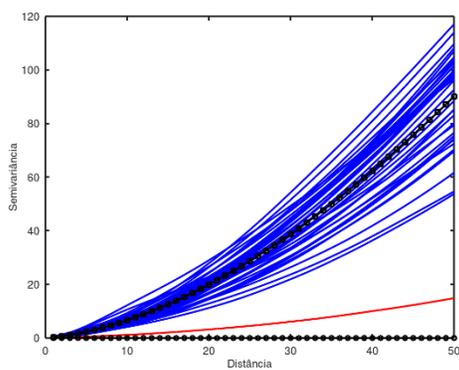
(b)



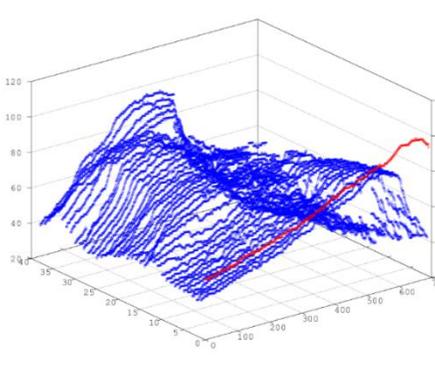
(c)



(d)



(e)



(f)

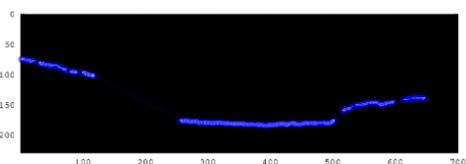
Fonte: Do Autor (2020)

O semivariograma também foi utilizado para a caracterização da variação da rugosidade, apresentando ser uma ferramenta indicativa de presença de crosta, como proposto por Barreto et al (2019). A Figura 37 (e) mostra o gráfico para o cálculo do semivariograma para a área analisada e os dados separados pela ferramenta K-means, o qual dividiu em inúmeras iterações os dados da amostra em dois grupos de diferentes centroides, um centroide sempre fixo na posição horizontal, indicando curvas com a possível presença de crosta, e o outro centroide em posição variável, de acordo com a variação das curvas. As curvas em vermelho são as que possuem pouca variação de rugosidade, indicando uma possível presença de crosta, e as curvas em azul apresentam muita variação da rugosidade. A Figura 37 (f) apresenta em vermelho as curvas que apresentam pouca variação de rugosidade e, em azul, as curvas com muita variação.

Como proposto por Barreto et al., (2019), nesse trabalho o semivariograma funcionou como um indicativo de presença de crosta, como mostra a Figura 37 (e) o semivariograma, destacando em vermelho as linhas iluminadas com baixa variância espacial e consequentemente o indicativo de presença de crosta e, a Figura 37 (f) a identificação dessas linhas na área amostrada, ambas as áreas de erosão.

De acordo com a Tabela 1 e o Gráfico 2, a técnica desenvolvida apresentou duas amostras com comportamento inesperado, sendo essas identificadas como Amostra 6 e Amostra 10. Elas apresentam um alto valor do semivariograma as quais indicam uma alta variação. A Figura 38 mostra a identificação dessas falhas nas amostras, indicando que elas provêm de longas descontinuidades dos pontos. Essas descontinuidades foram identificadas em falha do setup, pois para as irregularidades dessas amostras, o setup não foi satisfatório, pois a câmera não conseguiu uma melhor identificação da linha do laser. A Figura 38 (a) mostra a identificação das coordenadas de cada ponto da imagem 23 da Amostra 6, verificando-se a descontinuidade dos pontos e (b) a imagem original dessa superfície, identificando falha no campo. A Figura 38 (c) mostra a falha da identificação dos pontos da Amostra 6, na qual nota-se a descontinuidades dos pontos em praticamente todas as imagens dessa amostra, em (d) a plotagem 3D da superfície, o qual mostra que essa descontinuidade não interfere nessa fase. O programa para a geração das coordenadas dos pontos que está em Anexos A não apresenta erro ao rodar devido a esses pontos de descontinuidades, pois quando o programa não consegue identificar o ponto da coluna seguinte para o cálculo das coordenadas, ele identifica o próximo ponto e faz quantas interpolações forem necessárias para preencher essas colunas. A Figura 38 (e), (f), (g) e (h) mostra a identificação dessa falha para a Amostra 10, que não é tão nítida quanto a apresentada na Amostra 6, mas também se mostrou relevante, sendo em (a) a identificação das coordenadas de cada ponto da imagem 26 da Amostra 10, verificando-se a descontinuidade dos pontos e (b) a imagem original dessa superfície, identificando falha no campo. A Figura 38 (c) mostra a falha da identificação dos pontos da Amostra 6, na qual nota-se as descontinuidades dos pontos em praticamente todas as imagens dessa amostra, em (d) a plotagem 3D da superfície, o qual mostra que essa descontinuidade não interfere nessa fase. As falhas apresentadas nas extremidades das imagens não interferem nos cálculos

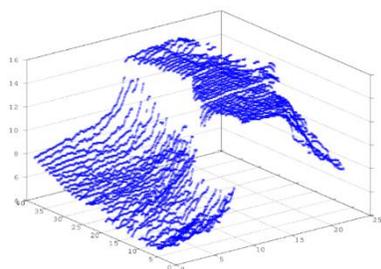
Figura 37 Identificação da falha da técnica em (a) Identificação dos pontos da imagem 23, (b) imagem original 23 da Amostra 6, (c) identificação das coordenadas dos pontos de todas as imagens da Amostra 6 e (d) plotagem da superfície da Amostra 6; (e) identificação dos pontos da imagem 26, (f) imagem original 26 da Amostra 10, (g) identificação das coordenadas dos pontos de todas as imagens da Amostra 10 e (h) plotagem da superfície da Amostra 10



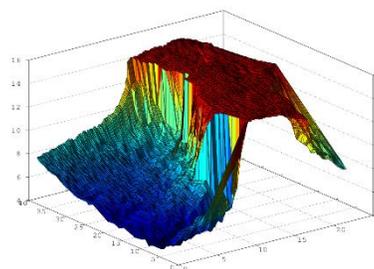
(a)



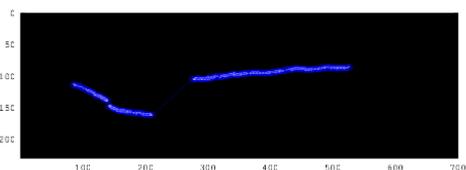
(b)



(c)



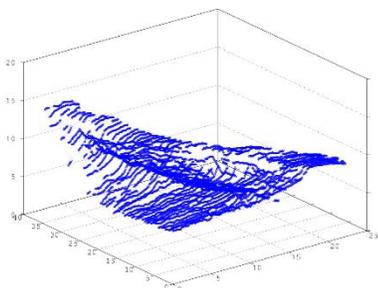
(d)



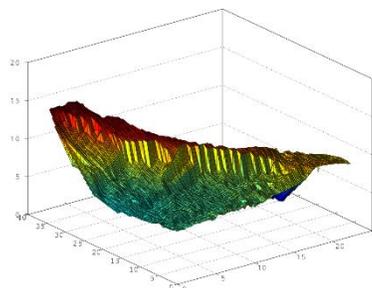
(e)



(f)



(g)

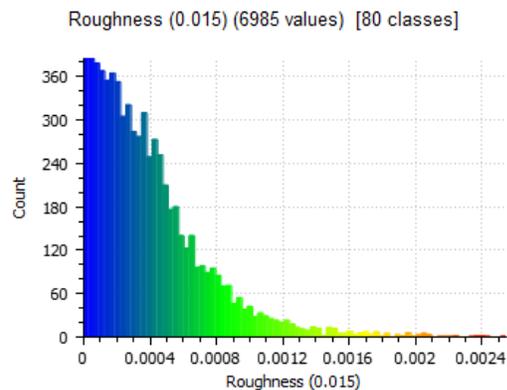


(h)

5.4.3 Comparação da técnica desenvolvida com SfM

Para a comparação dos resultados, como descrito na seção 4.6 foi utilizada a técnica de Struct from Motion (SfM), no qual os dados de rugosidade média foram adquiridos, processados e disponibilizados pelo Departamento de Ciência do Solo na Universidade Federal de Lavras. Cada região demarcada na área experimental de erosão, como mostra na Figura 23, foi identificada dentro do programa CloudCompare através da ferramenta “segmentation”, a qual permitiu o cálculo da rugosidade média, utilizando também o raio do cilindro equivalente a 1,5 cm, para cada uma das regiões analisadas. Em resposta, obteve-se um arquivo de texto com a intensidade apresentada por cada classe da variação de rugosidade e o valor da repetibilidade em cada das classes de rugosidade média existente em cada área analisada, como mostra o histograma ilustrando esses dados, contido no Gráfico 3, no qual o eixo “x” refere-se às variações da rugosidade classes de variação de rugosidade e o eixo “y” a quantidade de pontos com a essa rugosidade.

Gráfico 3: Histograma para o cálculo da rugosidade do programa CloudCompare



Fonte: Do Autor (2020)

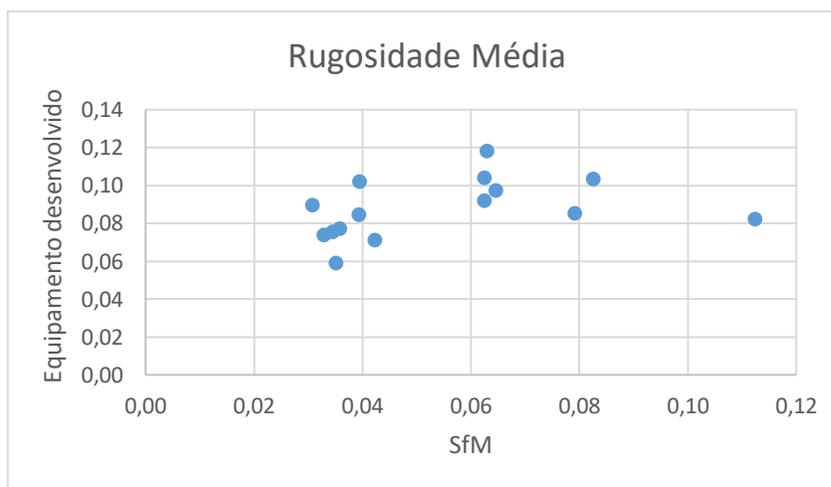
Como os valores de rugosidade média da nuvem de pontos extraídos do programa CloudCompare não são separados pelas posições e sim pelo valor da variação da rugosidade, observado no Gráfico 3, não foi possível aplicar a ferramenta geoestatística semivariograma para a comparação dos resultados. Visto isso, foram comparados os dados de rugosidade média como proposto por Giardeu et al (2019). Para a obtenção de um valor médio de rugosidade, foi realizada a média ponderada com o valor de cada classe. A Tabela 2 mostra para cada uma das áreas demarcadas o cálculo da rugosidade realizado pela a técnica desenvolvida e pela técnica de SfM, como a nuvem de pontos extraída da técnica SfM

Tabela 2: Rugosidade média proveniente da técnica desenvolvida e SfM

Amostra	Rugosidade Média	
	Equipamento Desenvolvido	SfM
3	0,0853662000	0,0791723086
4	0,1020507390	0,0394749000
6	0,0821185288	0,1123922000
7	0,0756059669	0,0346088000
8	0,1182196770	0,0629590000
9	0,0591343150	0,0351173000
10	0,0974998069	0,0646464300
11	0,1040944140	0,0625226000
12	0,0921141050	0,0625080000
16	0,0771780000	0,0358050000
17	0,1034915030	0,0825897000
18	0,0711706423	0,0422706000
20	0,0844529971	0,0393975000
21	0,0897225930	0,0307827936
22	0,0736989183	0,0329571000

Fonte: Do Autor (2020)

Gráfico 4: comparativo entre as técnicas em análise, eixo “x” a técnica desenvolvida e eixo “y” SfM



Fonte: Do Autor (2020)

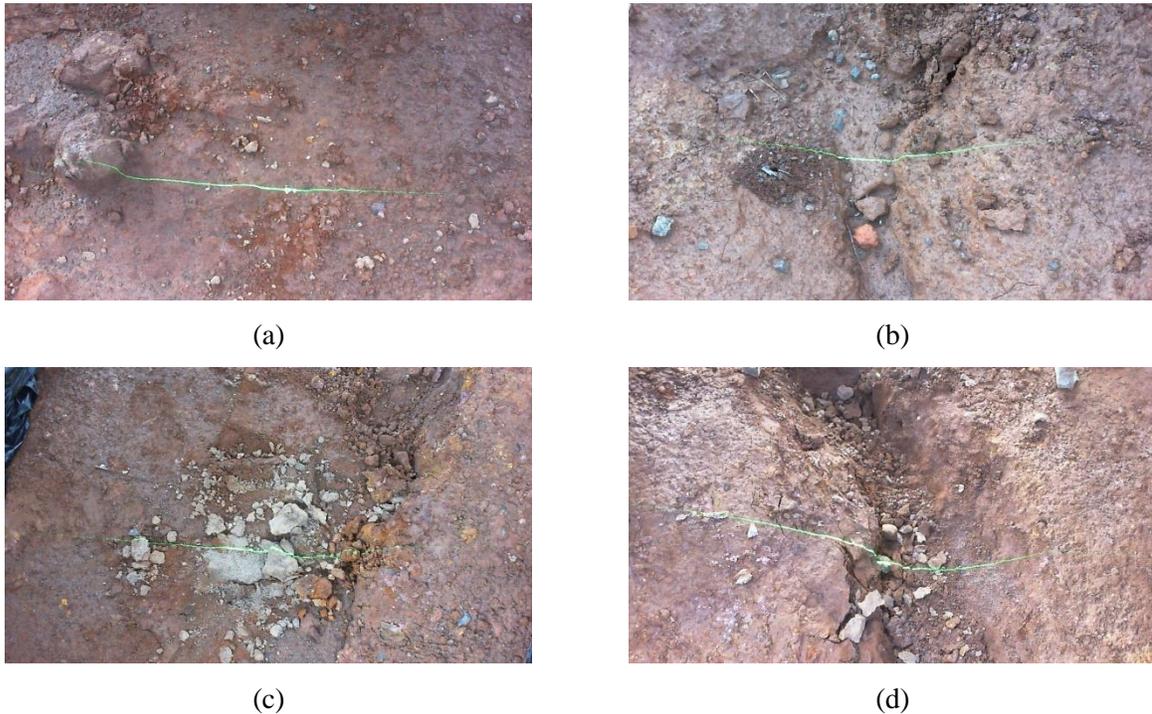
De acordo com o Gráfico 4, que apresenta a rugosidade média calculada pelas duas técnicas comparadas, consegue-se observar que a técnica SfM, que é representada pelo eixo x, foi sensível para separar os resultados em quatro centros de massa diferentes; o primeiro com variação de rugosidade média,

aproximadamente 0,03 e 0,04, o segundo próximo a 0,06, o terceiro próximo a 0,08 e o quarto, com apenas um ponto, próximo a 0,11.

Ao verificar a superfície real das áreas amostradas, verificou-se que as amostras do primeiro centro de massa possuem pouca variação da superfície, enquanto as demais possuem uma variação maior, sendo essas representadas por um caminho de caminhos d'água na superfície, o que tornou essa separação verdadeira. Então, para essas amostras, a técnica SfM se mostrou mais sensível na classificação quanto à rugosidade do que a técnica desenvolvida. Porém, as amostras de variação de rugosidade próximo a 0,06 e 0,08 possuem características similares, sendo essa separação não válida. Para o ponto isolado, com variação de rugosidade próximo a 0,11, as duas técnicas falharam na caracterização. Esse ponto possui um formato diferenciado na superfície devido ao caminho d'água que o compõe, no qual nenhuma das duas técnicas conseguiram acessar totalmente sua superfície para caracterizá-lo verdadeiramente; com isso, as duas técnicas utilizadas falharam para essa amostra. A superfície da amostra 6 e suas falhas foram apresentadas anteriormente pela Figura 38 (b).

Outra observação possível para a comparação dessas duas técnicas em análise foi a verificação dos pontos de mínimo e máximo valor da variação da rugosidade apresentado por cada uma e verificada com a superfície real. Considerando que as duas técnicas falharam na Amostra 6 e descartando esses dados, a técnica proposta pelo equipamento desenvolvido encontrou o menor valor de variação rugosidade da superfície para a área da Amostra 16 (FIGURA 39 a), e o maior valor para a Amostra 8 (FIGURA 39 b), enquanto a técnica SfM classifica como a área de menor variação a Amostra 21 (FIGURA 39 c) e de maior variação a Amostra 17 (FIGURA 39 d). Contudo, com a validação visual, pode-se observar que o equipamento desenvolvido caracterizou melhor a área de menor variação da rugosidade superficial, enquanto SfM caracterizou melhor a amostra de maior variação na superfície. Com isso, pode-se afirmar que as duas técnicas apresentam falhas.

Figura 38 Imagens superficiais das áreas amostradas em (a) Amostra 16, (b) Amostra 8, (c) Amostra 21 e (d) Amostra 17

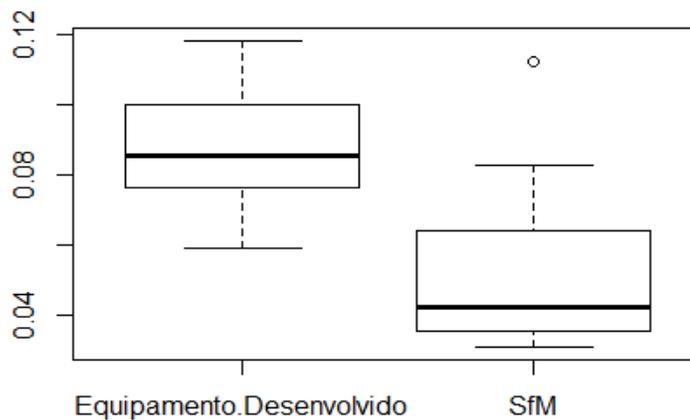


Fonte: Do Autor (2020)

Para a verificação da existência de relação estatística dos dados de rugosidade média provenientes da técnica do Equipamento desenvolvido e da técnica utilizada como referência (Struct from Motion), utilizaram-se testes baseados na normalidade das variáveis. Assim, utilizou-se o teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de significância, no qual a hipótese nula (H_0) considera que os dados são provenientes de uma distribuição normal, contra a hipótese alternativa (H_1), que considera que os dados não são provenientes de uma distribuição normal. Sendo assim, para p valor com resultado superior a 0,05, havia normalidade entre as amostras, enquanto p valor com resultado inferior à 0,05, não existia normalidade entre as amostras, ou seja, os dados não são provenientes de uma distribuição normal. Como resultado do teste, a variável Equipamento Desenvolvido apresentou normalidade, com p -valor valor igual a 0,9931, enquanto a variável SfM não obteve normalidade, com valor-p igual a 0,002. Como apenas uma das variáveis analisadas apresentou normalidade na amostra, o teste de correlação utilizado foi o de Spearman, no qual apresentou valor-p equivalente a 0,0582. Com isso, notou-se que ao nível de 5% de significância pelo teste de correlação de Spearman, que não há relação entre o Equipamento desenvolvido e SfM (valor-p > 0,05); portanto, existe evidência de que as duas variáveis não dependem uma da outra. O Gráfico 5 mostra o Boxplot das variáveis em estudo Equipamento Desenvolvido e SfM, no qual o eixo x representa as variáveis em análise

e o eixo y, os valores correspondentes de rugosidade média para cada técnica em questão. Esse gráfico também apresenta o valor atípico fora do box, também conhecido como outliers, e a linha em negrito dentro do box como a mediana de cada amostra.

Gráfico 5 Boxplot das variáveis Equipamento Desenvolvido e SfM para área de erosão



Fonte: Do Autor (2020)

Como as variáveis em estudo da rugosidade superficial do solo Equipamento Desenvolvido e SfM não possuíram relação entre si, pode-se dizer que a técnica SfM utilizada como referência não se mostrou favorável, pois ela também apresentou falhas. Aguirre et al. (2019) ao avaliar as técnicas de fotogrametria 3D Scanner Laser Terrestre (TLS) e SfM com perfil 2D de um rugosímetro à laser para medir a rugosidade superficial em solos agrícolas ressaltaram que as duas técnicas fotogramétricas se mostraram relevante para a caracterização da rugosidade superficial do solo. Porém, destacaram que para áreas com maior variação da rugosidade, foram melhor representadas pelo rugosímetro à laser, enquanto as áreas com menor variação da rugosidade foram melhor representadas pelas técnicas fotogramétricas TLS e SfM. Outra observação feita por eles foi que regiões sombreadas devido a grandes agregados na superfície do solo (HENG et al., 2010) causaram diferenças consideráveis em alguns perfis. Ambos os casos também foram observados com o Equipamento Desenvolvido e SfM. Esses autores ainda ressaltam a necessidade de melhoria na resolução da técnica SfM para estudos da rugosidade superficial.

Romero et al., (2015) ao avaliar o processo erosivo do solo na região central da Espanha apresentou vantagens e desvantagens da técnica SfM. As vantagens destacaram por ser não invasiva, de baixo custo, pouco peso do equipamento, alta velocidade de aquisição dos dados e alto número de fotos para minimizar áreas perdidas; E, como desvantagens, precisão em centímetro, dificuldade em monitorar grandes áreas,

pós-processamento de imagens trabalhoso e problemas com a mudança de iluminação. Ao compará-las ao Equipamento Desenvolvido, destaca-se que este apresenta custo mais baixo e softwares livres para o processamento de dados, entretanto, as desvantagens são as mesmas apresentadas por SfM.

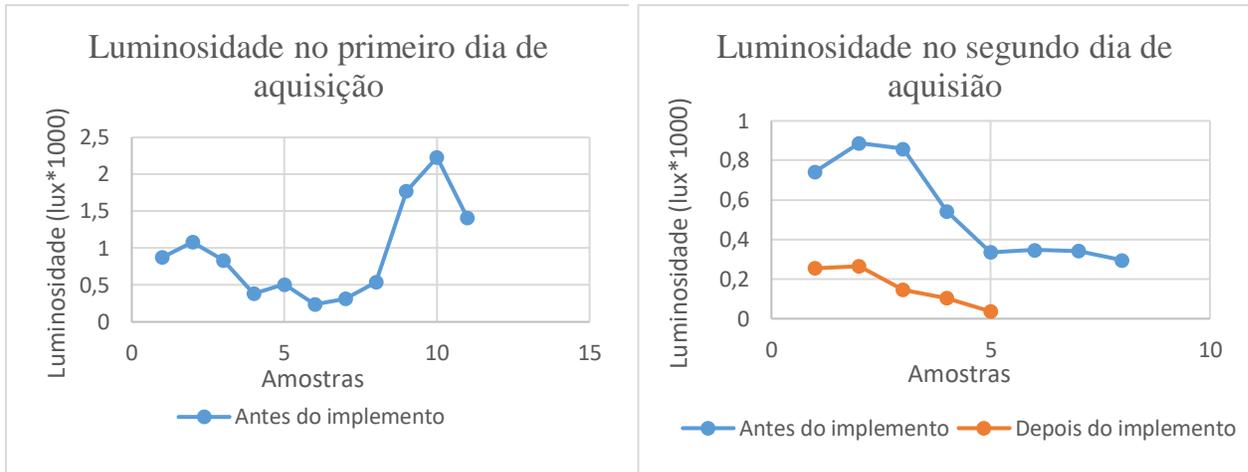
5.5 Aplicação em campo para *Compost Barn*

Para a aplicação em *Compost Barn*, foram iluminadas 19 áreas amostrais antes do revolvimento da superfície com o implemento composto por escarificador e enxada rotativa e 5 áreas amostrais após o revolvimento da área. Diferentemente da área de erosão, não foi preciso descartar nenhuma área amostral devido à pouca variação de profundidade. Apesar de essa superfície apresentar variações mais significativas, estavam praticamente todas na mesma profundidade, como mostra a Figura 28. Como a área de *Compost Barn* é um galpão com cobertura em telha de alumínio, a superfície não apresentou luminosidade solar direta, não sendo necessário o uso do sombrite, como utilizado na área de erosão.

Nesse experimento, a aquisição dos dados ocorreu em dois dias consecutivos, devido à disponibilidade da área pelo horário da ordenha, sendo realizadas das 13 horas às 18 horas. Vale ressaltar também que o experimento foi realizado no mês de fevereiro, sendo as horas com luminosidade solar mais longas devido ao horário de verão. No primeiro dia, foram iluminadas 11 áreas antes da atividade do implemento, e no segundo dia, 8 áreas antes da atividade do implemento e 5 áreas depois do implemento.

Mesmo não apresentando luz solar direta sobre a superfície, também foi observada uma alta variação na intensidade da luminosidade registrada pelo Luxímetro, como apresentado no Gráfico 6, no qual, o Gráfico 6 (a) apresenta a variação da luminosidade no primeiro dia de aquisição, sendo todas as amostras iluminadas antes da atividade do implemento. Já o Gráfico 6 (b) apresenta os dados de luminosidade para o segundo dia de aquisição, no qual em azul estão os dados das áreas antes do implemento e, em amarelo, depois da atividade do implemento. Como observado para aplicação a área de erosão, para a área de *Compost Barn* a variação da luminosidade foi um dos contribuintes para a alteração no processamento de imagens para limpeza das interferências buscando uma melhor identificação da linha do laser. Vale ressaltar, que essa variação também não interferiu no resultado da rugosidade.

Gráfico 6: Variação da luminosidade durante a aquisição dos dados para *Compost Barn* em (a) antes da modificação da superfície pelo implemento utilizado (b) após a modificação da superfície.



(a)

(b)

Fonte: Do Autor (2019)

5.5.1 Pré-processamento de imagens

Como também aconteceu com os dados provenientes da área de erosão, o processamento de imagens também precisou ser modificado para o *Compost Barn*, devido às varrições incontrolláveis presente no campo. Vale ressaltar que o sistema *Compost Barn* é composto por uma cama sobreposta; neste caso, proveniente de serragem, sobre o qual os animais realizam suas necessidades fisiológicas; sendo assim, na superfície encontram-se fezes, urina, pelos dos animais, além de outros itens incorporados na serragem. Para retirar essas interferências presentes nas imagens para a melhor identificação da linha do laser, além da metodologia proposta por Barreto et al (2019), realizada no programa ImageJ na qual se utilizam a imagem “green” da decomposição RGB e a binarização por Threshold, foi acrescentada a ferramenta “Analyze Particles”, também do ImageJ, por meio da qual se conseguiu selecionar a linha do laser e “Clear Out Side” para eliminar as interferências que não faziam parte da mesma. A Figura 40 ilustra a limpeza dessas interferências no novo processamento de imagens, em que: (a) imagem original, (b) cor “green” da decomposição em RGB mais a binarização Threshold e (c) “Analyze Particle” e “Clear out side”.

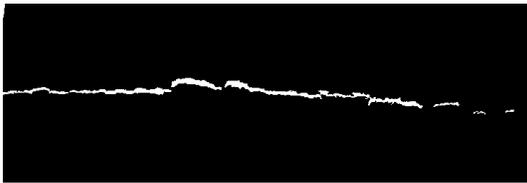
Figura 39 Processamento de imagens para a área de Compost Barn (a) imagem original, (b) cor "green" da decomposição em RGB e Threshold e (c) "Analyze Particle" e "Clear outside"



(a)



(b)



(c)

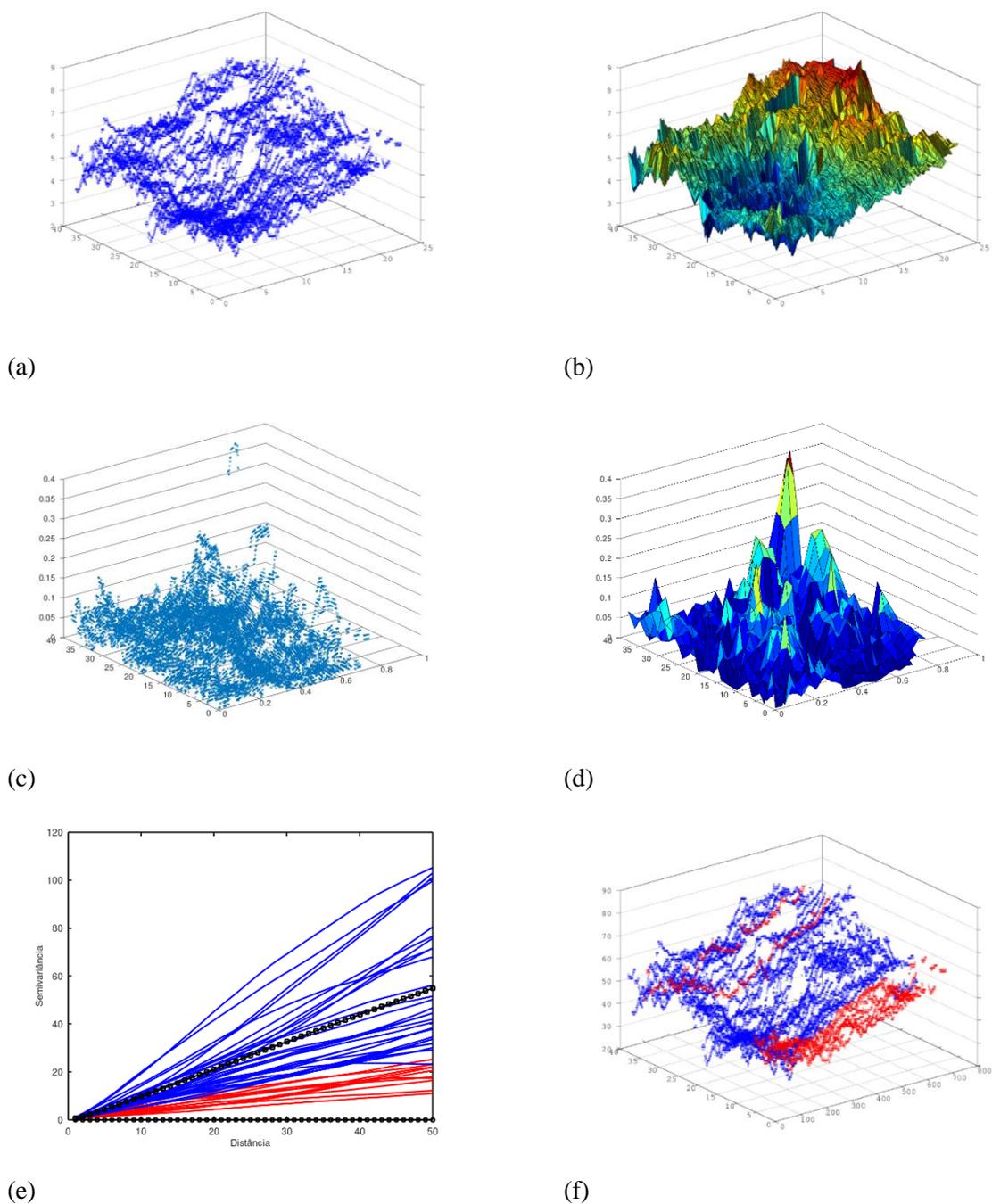
Fonte: Do Autor (2019)

5.5.2 Caracterização da rugosidade

Para a caracterização da rugosidade foram utilizadas as rotinas em anexo para os devidos processamentos, ANEXO A, ANEXO B e ANEXO C. Apenas o ANEXO B apresentou diferença no raio utilizado para o cálculo da rugosidade média, sendo este equivalente a 10 cm.

A Figura 41 exemplifica os resultados desses processamentos para uma área amostrada do *Compost Barn* antes da atividade do implemento, no qual (a) identificação das coordenadas x , y , z de cada ponto processado, (b) a plotagem 3D dessa superfície, (c) a identificação dos pontos calculados da variação da média, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade média, (e) semivariograma identificado pela ferramenta K-means e (f) plotagem da superfície com identificação das curvas em vermelho com indicativo de presença de crosta.

Figura 40 Variação da rugosidade para dados de Compost Barn antes da atividade do implemento (a) identificação das coordenadas x, y, z de cada ponto, (b) plotagem 3D da superfície, (c) identificação dos pontos calculados da variação da rugosidade, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade, (e) semivariograma e (f) identificação em vermelho das curvas com indicativo de presença de crosta



Fonte: Do Autor (2020)

A Tabela 3 mostra os valores da rugosidade média e semivariância calculados anteriormente para cada uma das áreas amostrais. O Gráfico 6 ilustra a variabilidade dos dados apresentados na Tabela 3, no

qual o eixo “x” representa os dados da semivariância o eixo “y” os dados do equipamento desenvolvido, chamado de laser.

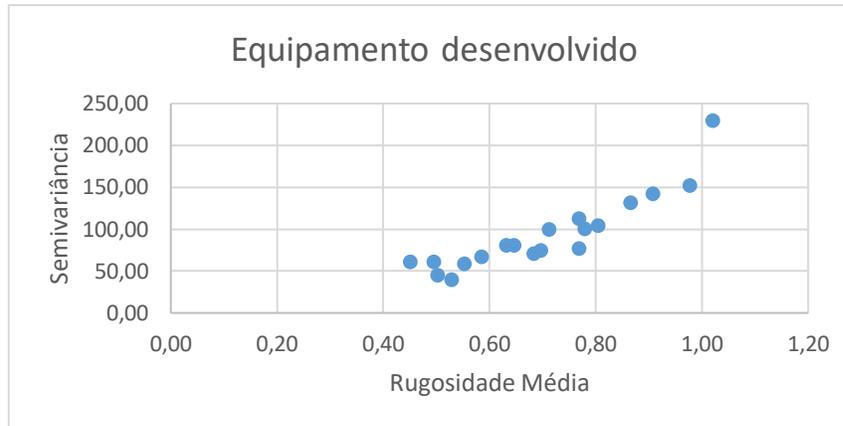
Tabela 3: Rugosidade média e índice de semivariância pelo equipamento desenvolvido para os dados de *Compost Barn* antes da atividade do implemento

Equipamento desenvolvido		
Amostra	Rugosidade Média	Semivariância
1	0,977044135	152,21
2	0,494301155	60,97
3	0,865838907	131,72
4	0,803571029	104,65
5	0,767933134	113,04
6	0,907571178	142,51
7	0,58441318	67,013
9	0,778668352	100,42
11	0,767959405	77,14
12	0,682641765	71,36
14	0,528659257	40,18
15	1,01942609	230,09
16	0,48084246	60,93
17	0,646123889	80,86
18	0,552328155	59,12
19	0,502265122	45,67
20	0,711623616	99,88
21	0,631517591	81,00
22	0,696036455	75,10

Fonte: Do Autor (2020)

Como proposto por Barreto et al., 2019, neste trabalho o semivariograma funcionou como um indicativo de presença de crosta, como mostra a Figura 41 (e) o semivariograma, destacando em vermelho as linhas iluminadas com baixa variância espacial e consequentemente o indicativo de presença de crosta e, a Figura 41 (f) a identificação dessas linhas na área amostrada, ambas as áreas para antes da atividade do implemento.

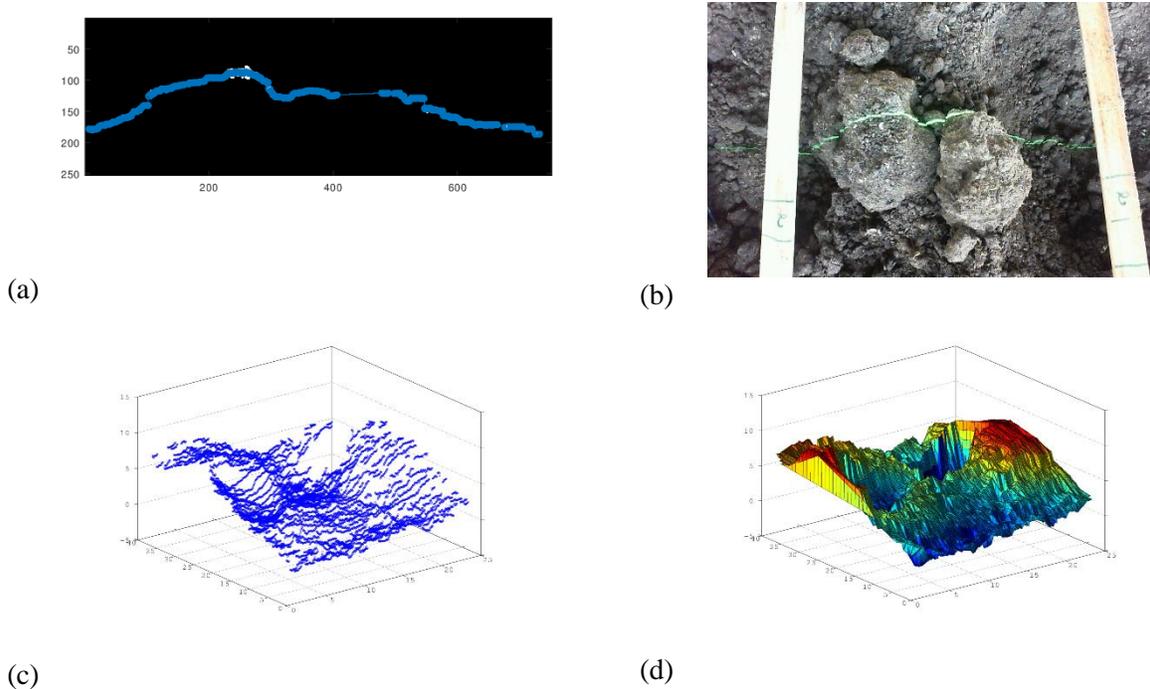
Gráfico 7: Rugosidade média “x” versus semivariância “y” pelo equipamento desenvolvido para área de *Compost Barn* antes da atividade do implemento



Fonte: Do Autor (2020)

Como mostra o Gráfico 7, os resultados do equipamento desenvolvido para rugosidade média e semivariância apresentaram um comportamento mais uniforme, próximo a uma linearidade. Uma área amostrada apresentou o valor extraído da semivariância fora do padrão dos demais resultados, a qual foi identificada como Amostra 15 do experimento realizado com *Compost Barn*. O valor dela foi identificado na Tabela 3, na qual se consegue verificar que ele apresenta um valor bem maior que as demais amostras. A Figura 42 mostra a identificação dessa falha apresentada, em (a) consegue-se ver a descontinuidade dos pontos na identificação do laser de linha sobre a superfície, e como mostra na imagem original em (b), essa descontinuidade se dá devido às imperfeições da superfície proveniente do tamanho dos torrões iluminados nessa amostra. Como esses torrões de *Compost Barn* apresenta-se em grande tamanho, o mesmo ofusca uma parte da linha do laser, causando, assim, a falha apresentada. Em (c), na identificação das coordenadas dos pontos de todas as imagens, consegue-se identificar essa falha em todas as imagens nas quais ela se apresenta. Como também foi relatado nos dados provenientes da área de erosão, essa falha não apresentou diferença na plotagem 3D da superfície, mostrado em (d) e nem no cálculo da rugosidade média.

Figura 41 Identificação da falha da técnica em (a) Identificação dos pontos da imagem 23, (b) imagem original 23 da Amostra 15 Compost Barn, (c) identificação das coordenadas dos pontos de todas as imagens da Amostra 15 e (d) plotagem da superfície da Amostra 15

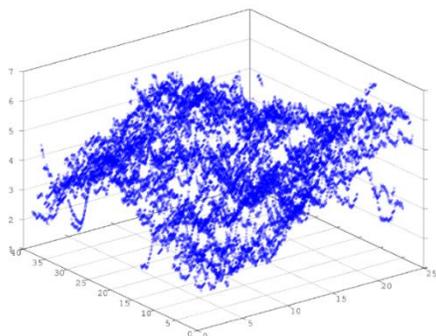


Fonte: Do Autor (2020)

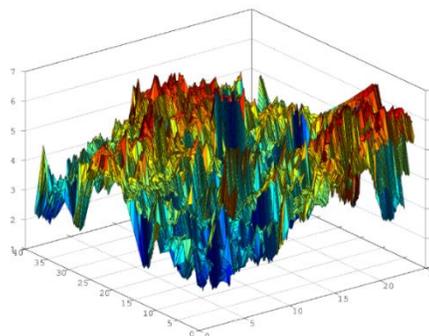
Já a Figura 43 exemplifica os resultados do processamento para uma área amostrada após a realização da atividade do implemento, sendo então, (a) identificação das coordenadas x , y , z de cada ponto processado, (b) a plotagem 3D dessa superfície, (c) a identificação dos pontos calculados da variação da média, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade média, (e) semivariograma identificado pela ferramenta K-means e (f) plotagem da superfície com identificação das curvas em vermelho com indicativo de presença de crosta.

A Tabela 4 mostra os dados numéricos extraídos dos processamentos anteriores para as áreas após a atividade do implemento. E, o Gráfico 7, a plotagem desses dados, no qual no eixo “ x ” corresponde aos dados provenientes do Semivariograma e eixo “ y ” aos provenientes da rugosidade média.

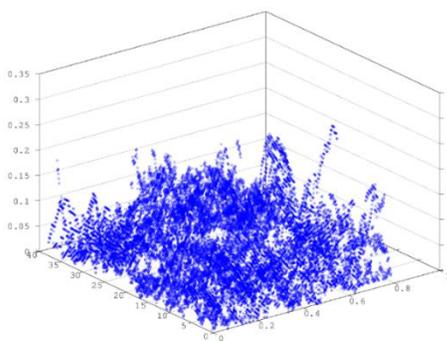
Figura 42 Variação da rugosidade para dados de Compost Barn depois da atividade do implemento (a) identificação das coordenadas x, y, z de cada ponto, (b) plotagem 3D da superfície, (c) identificação dos pontos calculados da variação da rugosidade, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade, (e) semivariograma e (f) identificação em vermelho das curvas com indicativo de presença de crosta



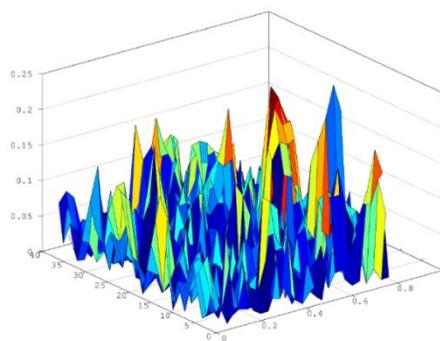
(a)



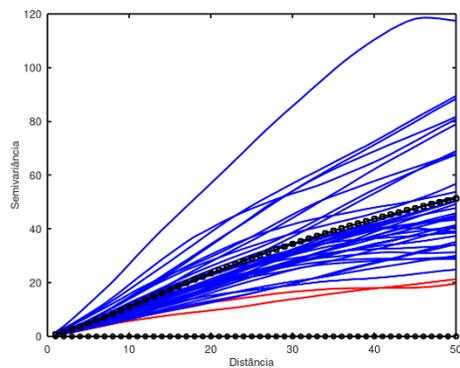
(b)



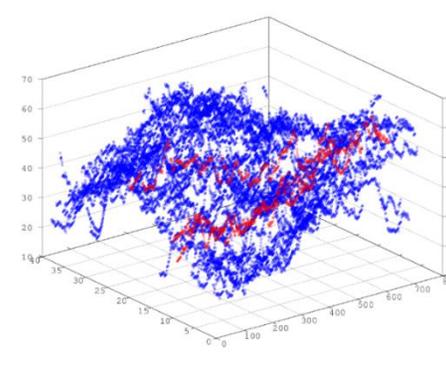
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Do Autor (2020)

Tabela 4: Rugosidade média e índice do semivariograma pelo equipamento desenvolvido para os dados de

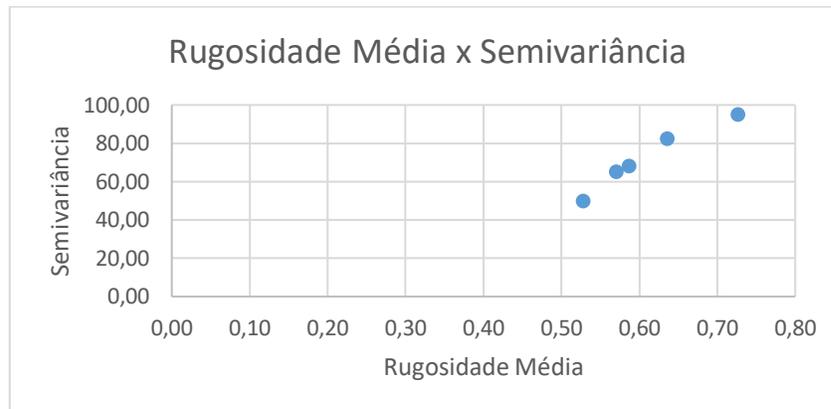
Compost Barn depois da atividade do implemento

Amostra	Equipamento Desenvolvido	
	Rugosidade Média	Semivariância
1	0,57037	65,08
2	0,52763	49,78
3	0,58699	64,08
4	0,63593	82,24
5	0,72663	95,05

Fonte: Do Autor (2020)

Como mostra o Gráfico 8, os resultados de semivariância e rugosidade média das áreas amostradas depois da passada do implemento também apresentaram um comportamento mais uniforme, próximo a linearidade.

Gráfico 8: Rugosidade média “x” versus semivariância “y” pelo equipamento desenvolvido para a área de

Compost Barn depois da atividade do implemento

Fonte: Do Autor (2020)

De acordo com os valores apresentados pelas técnicas aplicadas pelo equipamento desenvolvido, tanto os valores de semivariograma quanto os valores de rugosidade média das áreas amostrais antes da atividade do implemento, Tabela 3, se apresentaram-se maiores que os valores para depois da atividade do implemento, Tabela 4. Isso se deve ao fato de que antes da atividade do implemento, a superfície de *Compost Barn* se encontra mais irregular, apresentando torrões do composto em diversos tamanhos e formatos, além da marca deixada pela pisada dos animais. A atividade do implemento tem como objetivo uniformizar e descompactar toda a área do composto, deixando a superfície com menos variações e evitando a fermentação no seu interior. Esse processo proporciona o bem-estar animal. Contudo, observou-se que os valores da

rugosidade depois da atividade do implemento, tanto para rugosidade média quanto para semivariograma, se apresentaram-se redundante com uma variação menor ao serem comparados aos valores sem a atividade.

Como proposto por Barreto et al., (2019), neste trabalho o semivariograma funcionou como um indicativo de presença de crosta, como mostra a Figura 43 (e) o semivariograma, destacando em vermelho as linhas iluminadas com baixa variância espacial e consequentemente o indicativo de presença de crosta e, a Figura 43 (f) a identificação dessas linhas na área amostrada, para as áreas após a utilização do implemento.

5.5.3 Comparação da técnica desenvolvida com rugosímetro de varetas

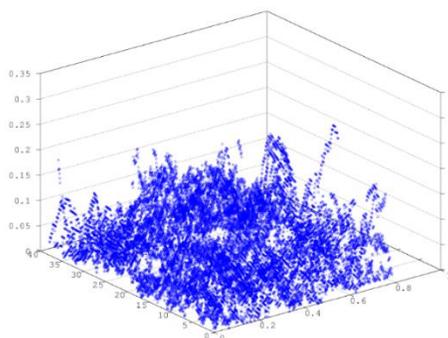
Para comparar os resultados para a área de *Compost Barn*, foi utilizado um rugosímetro de varetas como descrito na sessão 4.7. A Figura 44 ilustra a validação dos resultados da área antes da atividade do implemento, no qual para a mesma área foram medidas a variação de rugosidade pelo equipamento desenvolvido e pelo rugosímetro de varetas, em (a) mostra a identificação dos pontos da variação da rugosidade calculada pelo equipamento desenvolvido, (b) gráfico 3D da variação da rugosidade pelo equipamento desenvolvido, (c) identificação dos pontos da variação da rugosidade calculada pelo rugosímetro de varetas e (d) gráfico 3D da variação da rugosidade pelo rugosímetro de varetas. Pode-se observar que para o equipamento desenvolvido foi processado uma nuvem com uma quantidade maior de pontos do que o rugosímetro de varetas, possuindo assim uma sensibilidade maior.

A Tabela 5 mostra a rugosidade média calculada pelos dois métodos em análise, o rugosímetro de varetas e o equipamento desenvolvido para dados provenientes da área antes da atividade do implemento. E o Gráfico 9 a plotagem desses dados, no qual o eixo “x” representa os valores de rugosidade média provenientes do rugosímetro de varetas e o eixo “y” os do equipamento desenvolvido.

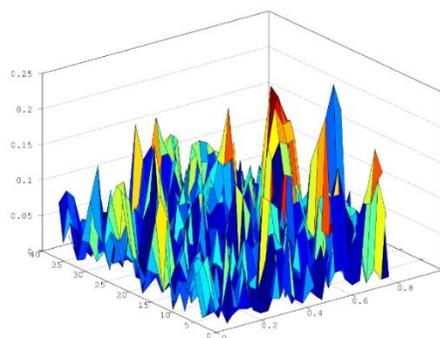
Ao analisar o Gráfico 9, que compara a técnica tradicional do rugosímetro de varetas com o equipamento desenvolvido, observa-se que o rugosímetro de varetas cria dois centros de massa diferentes, um aproximadamente de 0,9 a 1,3 e outro de 1,5 a 1,7, enquanto o equipamento desenvolvido não cria essa diferença. Ao analisar visualmente as superfícies das áreas amostradas, foi possível verificar que essa divisão entre os dois centros de massa não existe. Visualmente, as áreas amostradas possuíam variações de rugosidade classificadas como baixa, intermediária e alta, e não apenas classificadas em dois grupos, como sugere os resultados provenientes do rugosímetro de varetas. O rugosímetro de varetas também informa que a amostra que possui maior variação da superfície é a Amostra 5 (Figura 45a) e a menor, a Amostra 20 (Figura 45b), enquanto o equipamento desenvolvido as caracteriza em uma faixa de rugosidade média. Já o equipamento desenvolvido informa que a amostra que possui uma maior variação da rugosidade é a Amostra 15 (Figura 45c) e a de menor variação, a Amostra 16 (Figura 45d). Contudo, como mostrado na Figura 45,

é possível verificar visualmente que o equipamento desenvolvido possui resultados mais concisos, sendo este mais sensível para a caracterização da rugosidade.

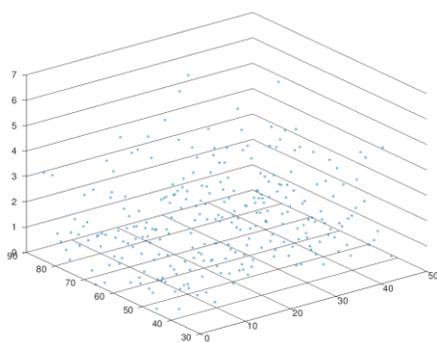
Figura 43 Comparação da variação de rugosidade pelos dois métodos em análise de uma área de Compost Barn antes da atividade do implemento, em que (a) identificação os pontos da variação da rugosidade pelo equipamento desenvolvido, (b) gráfico 3D da rugosidade do equipamento desenvolvido, (c) identificação dos pontos da variação da rugosidade pelo rugosímetro de varetas e (d) gráfico 3D da variação rugosidade pelo rugosímetro de varetas



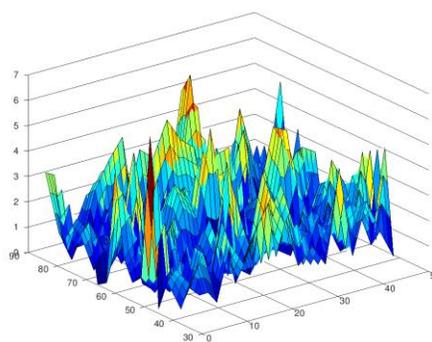
(a)



(b)



(c)



(d)

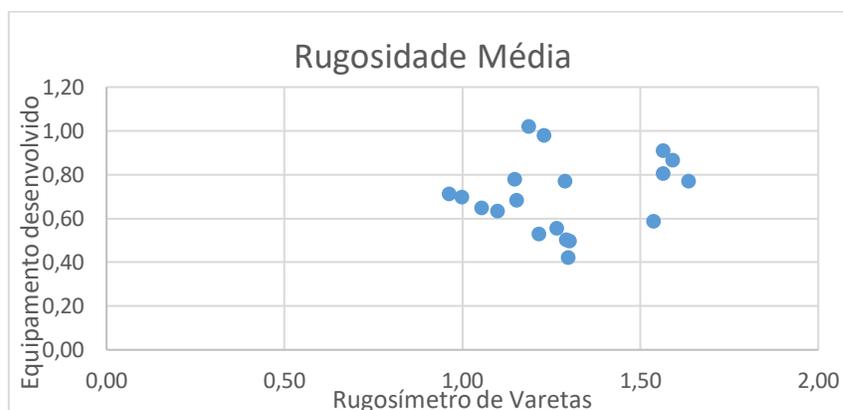
Fonte: Do Autor (2020)

Tabela 5: Rugosidade média proveniente da técnica desenvolvida e Rugosímetro de varetas antes da atividade do implemento

Amostra	Rugosidade Média	
	Rugosímetro de varetas	Equipamento Desenvolvido
1	1,22932232	0,977044135
2	1,30020967	0,494301155
3	1,59035598	0,865838907
4	1,56322823	0,803571029
5	1,63426168	0,767933134
6	1,56288518	0,907571178
7	1,5361541	0,58441318
9	1,14673111	0,778668352
11	1,2879232	0,767959405
12	1,15242271	0,682641765
14	1,21414113	0,528659257
15	1,18584384	1,01942609
16	1,297246	0,42084246
17	1,05348043	0,646123889
18	1,26374912	0,552328155
19	1,29133641	0,502265122
20	0,962048648	0,711623616
21	1,09744034	0,631517591
22	0,997180315	0,696036455

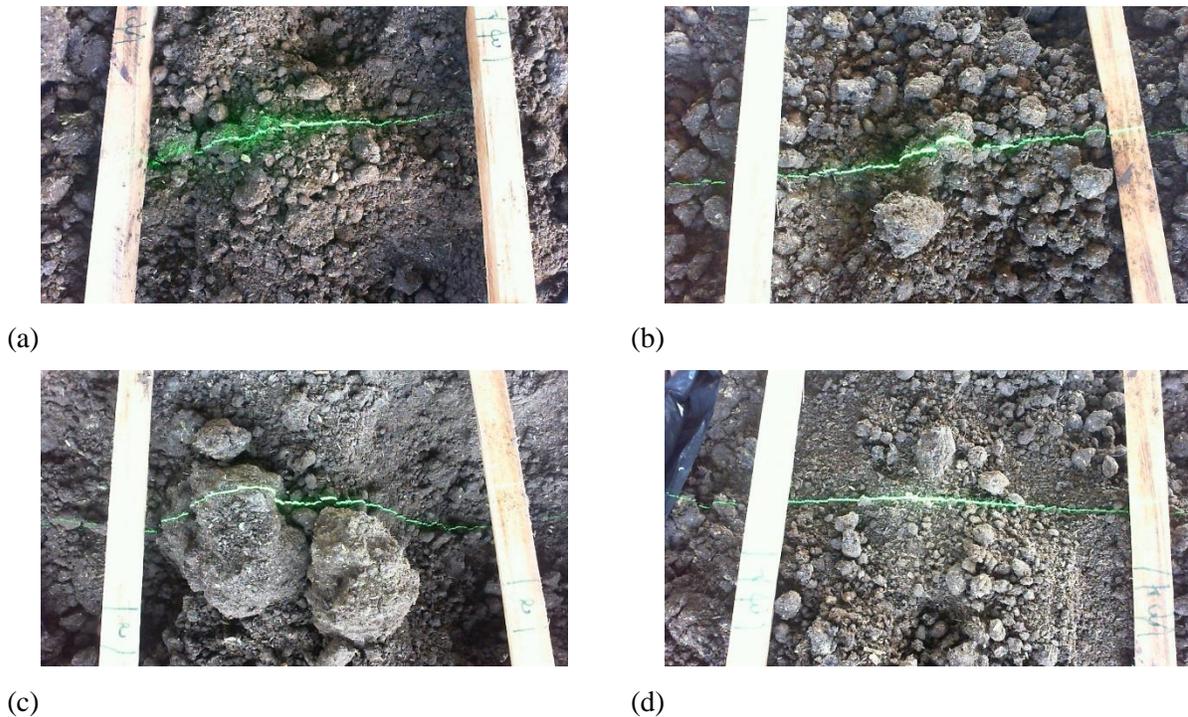
Fonte: Do Autor (2020)

Gráfico 9: Comparativo entre as técnicas em análise, eixo “x” a técnica desenvolvida, e eixo “y” Rugosímetro de Varetas antes da atividade do implemento



Fonte: Do Autor (2020)

Figura 44 imagens superficiais das áreas amostradas antes da atividade do implemento em (a) Amostra 5, (b) Amostra 20, (c) Amostra 15 e (d) Amostra 16

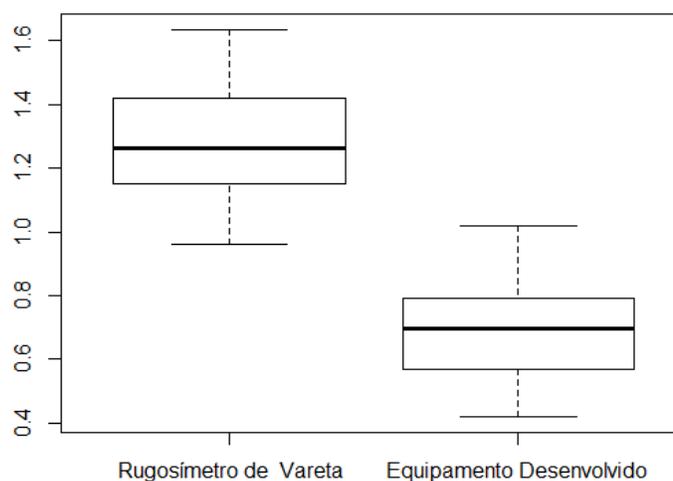


Fonte: Do Autor (2020)

Para a verificação da existência de relação estatística dos dados de rugosidade média provenientes da técnica do Equipamento Desenvolvido e da técnica utilizada como referência, no caso o Rugosímetro de varetas, antes da atividade do implemento, também utilizaram-se testes baseados da normalidade das variáveis. Assim, utilizou-se o teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de significância, no qual a hipótese nula (H_0) considera que os dados são provenientes de uma distribuição normal, contra a hipótese alternativa (H_1) que considera que os dados não são provenientes de uma distribuição normal. Sendo assim, para p valor com resultado superior a 0,05, havia normalidade entre as amostras, enquanto p valor com resultado inferior a 0,05, não existia normalidade entre as amostras. O Equipamento Desenvolvido apresentou o valor- p equivalente a 0,8988, apresentando normalidade dos dados na amostra, e o Rugosímetro de Varetas apresentou valor- p equivalente a 0,1397, apresentando também normalidade dos dados. Sendo assim, como as duas variáveis analisadas apresentaram normalidade, o teste de correlação utilizado foi o Pearson, no qual apresentou valor- p igual à 0,5800. Com isso, notou-se que ao nível de 5% de significância pelo teste de correlação de Pearson não há relação entre o Equipamento Desenvolvido e o Rugosímetro de Varetas (valor- $p > 0,05$); portanto, existe evidência de que as duas variáveis não dependem uma da outra. O Gráfico 5 mostra o Boxplot das variáveis em estudo Equipamento Desenvolvido e Rugosímetro de Varetas, no qual o eixo x representa as variáveis em análise e o eixo y, os valores correspondentes de rugosidade média para

cada técnica em questão. Esse gráfico não apresentou outliers e a linha em negrito representa a mediana de cada amostra.

Gráfico 10 Boxplot das variáveis Equipamento Desenvolvido e Rugosímetro de Varetas para área de *Compost Barn* antes da atividade do implemento.



Fonte: Do Autor (2020)

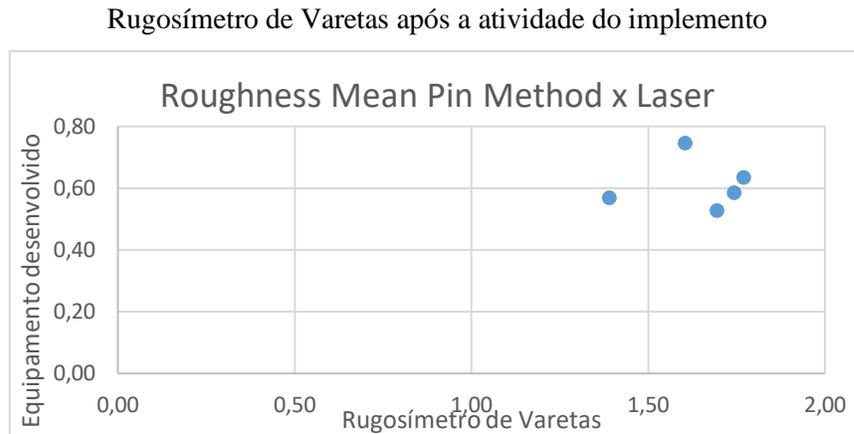
A Tabela 6 mostra os dados de rugosidade média da área em análise após a atividade do implemento, também medida pelos dois diferentes métodos. E, o Gráfico 8, a plotagem dos dados da Tabela 6, sendo também o eixo “x” representado pelos dados do rugosímetro de varetas e o eixo “y” pelo equipamento desenvolvido.

Tabela 6: Rugosidade média proveniente da técnica desenvolvida e rugosímetro de varetas após a atividade do implemento

Amostra	Rugosidade Média	
	Rugosímetro de varetas	Equipamento desenvolvido
1	1,38952573	0,570369699
2	1,6948825	0,527626129
3	1,74264948	0,586990137
4	1,76979358	0,6359269800
5	1,6043161	0,746626070

Fonte: Do Autor (2020)

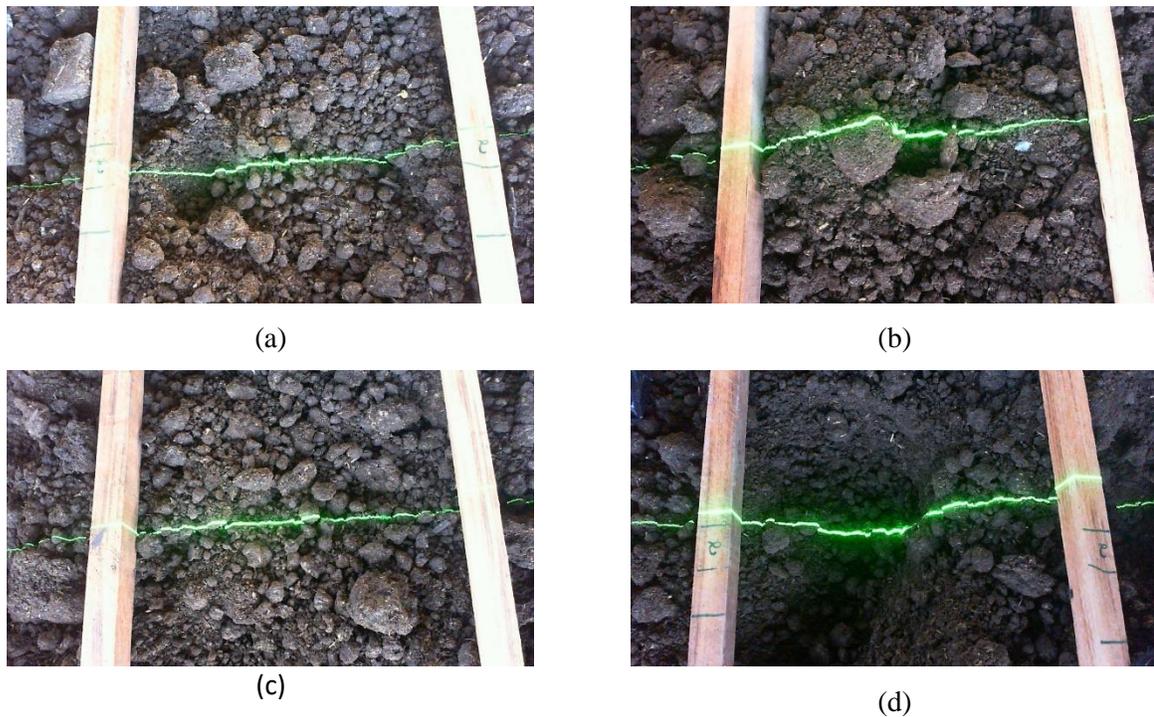
Gráfico 11: Comparativo entre as técnicas em análise, eixo “x” a técnica desenvolvida e eixo “y”



Fonte: Do Autor (2020)

Ao analisar o Gráfico 11, que compara os resultados de rugosidade média para as duas técnicas utilizadas na área amostral após a atividade do implemento, foi possível verificar que as duas se diferem quanto ao resultado. Para a validação dos resultados, também foi utilizada a técnica visual. Com isso, o rugosímetro de varetas apresenta o valor de variação mínima de rugosidade para a Amostra 1 (Figura 46 a) e o valor máximo de variação para a Amostra 4 (Figura 46 b), enquanto o equipamento desenvolvido apresenta variação de rugosidade mínima para a Amostra 2 (Figura 46 c) e máxima para a Amostra 5 (Figura 46 d). Ao utilizar a técnica visual para validação dos resultados, de acordo com a Figura 44, foi possível observar que os resultados provenientes do equipamento desenvolvido, tanto para a amostra que apresentou a variação mínima de rugosidade quanto para a amostra de variação máxima, apresentaram uma sensibilidade maior para caracterizar a rugosidade do que o rugosímetro de varetas.

Figura 45 Imagens superficiais das áreas amostradas depois da atividade do implemento em (a) Amostra 1, (b) Amostra 4, (c) Amostra 2 e (d) Amostra 5



Fonte: Do Autor (2020)

Já para a verificação da existência de relação estatística dos dados de rugosidade média provenientes do Equipamento Desenvolvido e Rugosímetro de Varetas depois da atividade do implemento, utilizou-se o teste não paramétrico de correlação de Kendall diretamente, pois como a amostra foi pequena (menor que 6 observações), o teste de normalidade e variância se tornariam pouco confiáveis nessas situações, comprometendo assim a validação das premissas. O resultado do valor-p foi equivalente a 0,8170. Sendo assim, ao nível de 5% de significância pelo teste de correlação de Kendall, não há relação entre a rugosidade média proveniente da Equipamento Desenvolvido e Rugosímetro de Varetas após a atividade do implemento (valor-p > 0,05). Portanto, conclui-se que as duas variáveis não dependem uma da outra. O Gráfico 12 mostra o Boxplot das variáveis em estudo Equipamento Desenvolvido e Rugosímetro de Varetas após a atividade do implemento, no qual o eixo x representa as variáveis em análise e o eixo y os valores correspondentes de rugosidade média para cada técnica em questão. Esse gráfico também apresenta outliers, e a linha em negrito, a mediana de cada amostra.

Gráfico 12 Boxplot das variáveis Equipamento Desenvolvido e Rugosímetro de Varetas para área de *Compost Barn* após da atividade do implemento.



Fonte: Do Autor (2020)

Como as variáveis em estudo da rugosidade superficial do *Compost Barn* pelo Equipamento Desenvolvido e Rugosímetro de Varetas não apresentaram relação entre si, conclui-se que a técnica rugosímetro de varetas utilizada como referência não se mostrou válida, pois ela apresentou falhas na identificação da variação da superfície, principalmente em regiões com pouca variação de rugosidade. Vale ressaltar que o Rugosímetro de Varetas utilizado possuía 3 cm de distância entre as varetas, tanto no eixo x quanto no eixo y, enquanto o Equipamento Desenvolvido obteve 30 pixels por cm no eixo x e um deslocamento de 1 cm no eixo y. Com isso, pode-se dizer que a nuvem de pontos para a mesma área analisada foi bem maior pelo Equipamento Desenvolvido do que pelo Rugosímetro de Varetas e, mostrando uma sensibilidade maior. Como o Equipamento Desenvolvido foi calibrado em laboratório com objetos de dimensões conhecidas, pode-se considerar a veracidade de seus dados.

Jester e Klik (2005) realizaram medições da superfície do solo usando rugosímetro de varetas e scanner a laser utilizando espaçamento de 25 mm para medidas de contato e 2 mm para as medidas sem contato, sendo assim, concluíram que o scanner a laser forneceu medições mais detalhadas da superfície do solo comparada às do rugosímetro de varetas. Esses autores fizeram uma comparação entre os diferentes métodos de medição da rugosidade, sendo o rugosímetro de varetas e corrente de rolo como os métodos de contato e fotogrametria e scanner laser como métodos sem contato, destacando que os métodos de contato possuem uma precisão limitada e maior tempo para processamento dos dados apesar de apresentarem custos mais baixos, comparando aos métodos sem contato.

Outro trabalho que fez uma comparação entre as técnicas para quantificação da rugosidade do solo foi Thomsen et al (2015) que comparou métodos de contato (corrente de rolo e rugosímetro de varetas) com métodos sem contato (estereofotogrametria, TLS e Xtio Pro). Eles destacaram que a resolução dos métodos

de contato restringe sua aplicabilidade, mesmo apresentando valores acessíveis, enquanto Xtion Pro provou ser um sensor útil e mais barato comparado às técnicas de TLS e estereofotogrametria. Em questão de valores, os métodos se apresentam na seguinte ordem crescente (com os valores cotados em euros no ano de 2015): Rugosímetro de varetas (30€), corrente de rolo (74€), Xtion Pro (200€), Estereofotogrametria (3145€) e TLS (60000€). Apesar de o TLS apresentar alta resolução e precisão em ambiente externo, ele não é prático para usar em grandes extensões e possui um valor muito alto. Para eles, todas as técnicas são válidas para medição da rugosidade, porém elas se diferem quanto à precisão e resolução exigidas, mobilidade no campo e orçamento disponível.

Para esse trabalho, as técnicas utilizadas tiveram os respectivos valores em ordem crescente (em reais para o ano de 2019): Rugosímetro de varetas R\$100,00, Equipamento Desenvolvido teve o valor de R\$ 5.349,00, SfM R\$ 25.000,00. Sendo assim, o Equipamento Desenvolvido apresentou resultados confiáveis com uma boa resolução a um preço bem inferior quando comparado ao SfM, além de ele se mostrar aplicável ao campo e de fácil manuseio.

5.6 Aplicação prática

A técnica foi usada com a construção de um novo setup em um outro país, com diferentes condições de aplicação. O setup foi construído com outros equipamentos, laser e câmera de modelos diferentes, mas com o mesmo objetivo, ou seja, identificar as melhores condições para melhor visualização da linha do laser que possa caracterizar a superfície analisada e simplificar o processamento de imagem. A validação passou pelos processos de construção do setup, calibração com objeto de coordenadas conhecidas, utilização de processamento de imagem adequado e aplicação prática.

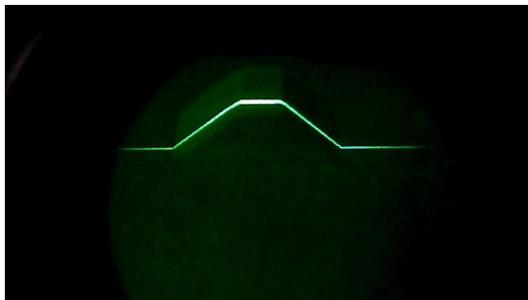
5.6.1 Construção do Setup

O setup foi construído buscando uma melhor identificação da linha do laser sobre a amostra. Para isso, o laser foi instalado a 53 cm de altura da amostra de solo e com ângulo de 90° e a câmera estava a uma altura de 16 cm da amostra distância de 10 cm da linha do laser. Para neutralizar as interferências de outras cores do ambiente, foi instalada uma lente da cor verde em frente à lente da câmera, permitindo assim maior nitidez na visualização da linha do laser e facilitando o processamento de imagens, O arranjo experimental foi ilustrado pela Figura 31. A mesa de coordenadas foi programada para realizar o movimento linear em torno do eixo “y” com velocidade constante de 1 mm/s, permitindo o registro de 50 imagens para cada amostra.

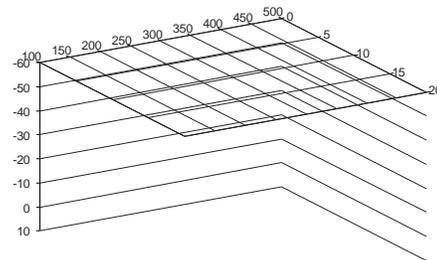
5.6.2 Calibração

A técnica foi calibrada com um trapézio de madeira de coordenadas conhecidas para identificação e calibração das coordenadas “x, y, z” de cada ponto identificado. A Figura 47 mostra o objeto utilizado e a plotagem da identificação dos seus eixos, em (a) objetos de coordenadas conhecidas, (b) a identificação dos eixos de cada ponto processado pelo programa e (c) a plotagem 3D da superfície.

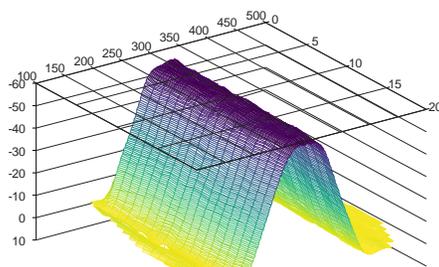
Figura 46 (a) Trapézio de coordenadas conhecidas para calibração da técnica (b) identificação dos pontos (c) plotagem 3D da superfície



(a)



(b)



(c)

Fonte: Do Autor (2020)

5.6.3 Processamento de imagens

Como esse novo setup contou com um componente adicional, a lente de cor verde na frente da câmera, foi possível ter um controle maior das condições que geram interferência da superfície da amostra. Com isso, a metodologia de binarização da imagem proposta por Barreto et al (2019) foi válida.

5.6.4 Caracterização da rugosidade

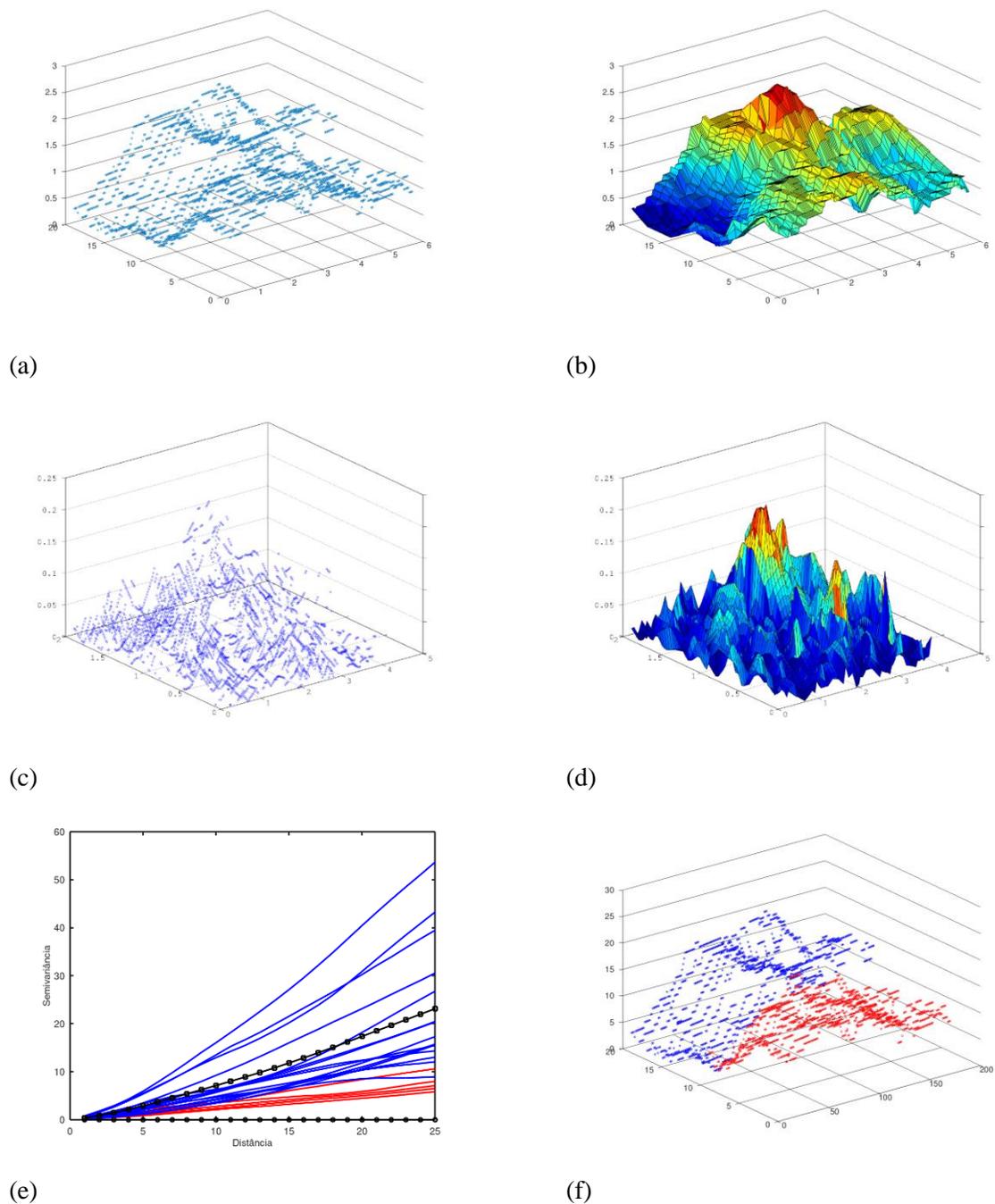
Os conjuntos de imagens tiveram os mesmos processamentos para caracterização da rugosidade e indicativo de presença de crosta que as áreas de erosão e *Compost Barn* presentes no ANEXO A, ANEXO B e ANEXO C. Na Figura 48 verificam-se os resultados para os processamentos de imagem para cevada em plantio direto, sendo em (a) a identificação das coordenadas x, y, z de cada ponto processado, (b) a plotagem 3D dessa superfície, (c) a identificação dos pontos calculados da variação da média, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade média, (e) semivariograma identificado pela ferramenta K-means e (f) plotagem da superfície com identificação das curvas em vermelho com indicativo de presença de crosta.

A Tabela 7 mostra os valores numéricos extraídos da rugosidade média e semivariograma para as todas as áreas amostradas, sendo para (a) Testemunha, na qual não teve plantio e manejo, (b) cevada plantio direto, (c) feijão plantio direto, (d) cevada arada e (e) feijão plantio direto. Para cada um dos métodos utilizados para caracterizar a rugosidade do solo, rugosidade média e semivariograma, foi utilizada uma análise de variância ANOVA bidirecional para separar os efeitos da cultura e manejo.

Sendo assim, os valores extraídos da rugosidade média apresentaram um valor-p equivalente a 0,047, e, como esse valor é menor que 0,05, pode-se concluir que ao nível de 95% de confiança pelo teste de variância ANOVA bilateral, houve uma variação significativa entre esses dados. Ou seja, o método de rugosidade média conseguiu separar as condições de rugosidade do solo para os tratamentos.

A Figura 49 ilustra a estatística para os dados de rugosidade média pelo teste de ANOVA, sendo a rugosidade média representada pelos pontos e o intervalo de confiança em 95% pelas barras em azul. Comparando as culturas, observou-se que a rugosidade média foi maior para feijão do que para cevada, tanto no plantio direto quanto no plantio convencional. Esse comportamento foi confirmado pelo fato de a cultura do feijão apresentar raízes mais profundas e grossas, enquanto a cevada, raízes mais rasas e finas. Essa diferença é claramente identificada quando é comparado o manejo, observando-se feijão no plantio direto e cevada no plantio direto, no qual não há sobreposição entre os intervalos de confiança para essas médias ao nível de 95% de confiança. Quando se comparam as duas culturas no cultivo tradicional, observou-se ainda que existe uma pequena diferença entre as médias devido à estrutura da raiz das plantas, porém essa diferença é mínima, se comparada ao plantio direto. Assim, a atividade do arado pelo plantio convencional praticamente interrompe a diferença de rugosidade do solo devido a diferença das raízes dessas culturas.

Figura 47 Variação da rugosidade para amostra de cevada para plantio direto em (a) identificação das coordenadas x, y, z de cada ponto, (b) plotagem 3D da superfície, (c) identificação dos pontos calculados da variação da rugosidade, (d) gráfico 3D da variação da rugosidade, (e) semivariograma e (f) identificação em vermelho de curvas com presença de crosta



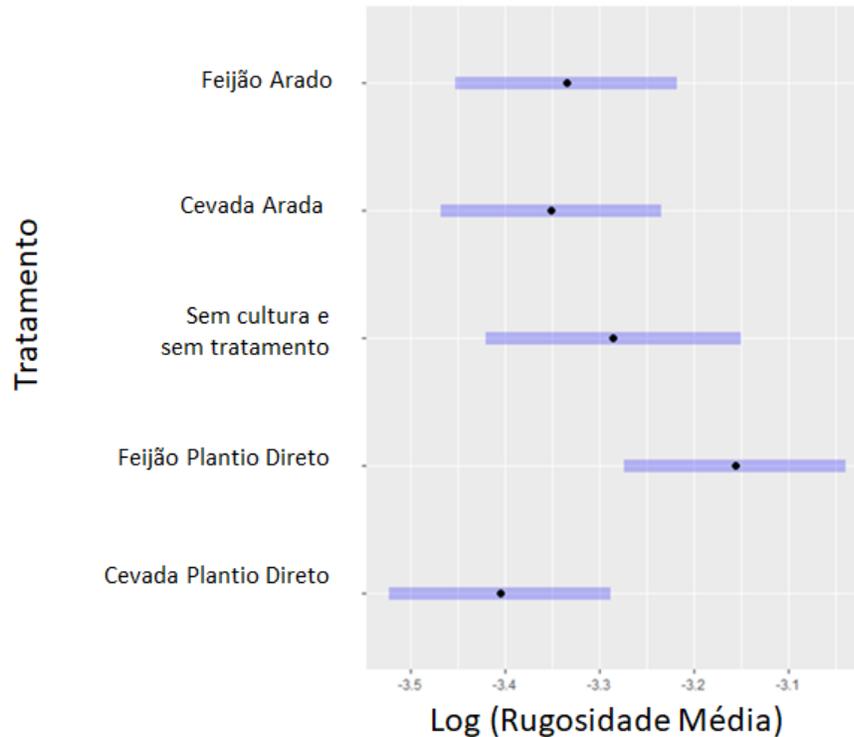
Fonte: Do Autor (2020)

Tabela 7: Dados da semivariância e rugosidade média para área de (a) Testemunha, (b) Cevada Plantio Direto, (c) Feijão Plantio Direto, (d) Cevada Arada e (e) Feijão Arado

Testemunha		Cevada Plantio Direto		Feijão Plantio Direto	
Semivariância	Rugosidade Média	Semivariância	Rugosidade Média	Semivariância	Rugosidade Média
23,0613	0,03106	20,9884	0,02547	60,2220	0,05956
19,1542	0,03690	15,3176	0,02905	69,1772	0,07479
18,5657	0,03095	10,7625	0,03013	30,3694	0,03314
45,3036	0,05106	9,3225	0,02866	30,1159	0,04175
35,2177	0,04080	41,4247	0,03497	19,2461	0,03237
52,1110	0,04280	36,5042	0,03496	21,9251	0,04146
44,4444	0,02816	19,7766	0,03833	10,7815	0,03142
14,4503	0,03600	49,5044	0,03860	6,8105	0,02938
34,1962	0,04485	19,2598	0,03901	54,0694	0,05349
(a)		20,4731	0,04283	11,9867	0,02928
		16,0773	0,03041	30,0004	0,05024
		17,2954	0,03047	48,4814	0,05897
		(b)		(c)	
Cevada Arada		Feijão Arado			
Semivariância	Rugosidade Média	Semivariância	Rugosidade Média		
29,8785	0,03399	52,6193	0,04916		
21,2150	0,03249	9,8197	0,02899		
22,8208	0,03293	17,5221	0,03783		
19,0331	0,03338	18,6278	0,02920		
9,5738	0,03172	43,7568	0,04017		
7,9448	0,03064	17,5714	0,03387		
38,6784	0,04152	14,3941	0,03786		
32,1290	0,03659	16,8877	0,02950		
27,3579	0,03750	32,3010	0,03764		
33,4879	0,04365	12,9807	0,03514		
24,3628	0,03282	51,3364	0,04154		
24,3507	0,03561	10,3689	0,03162		
(d)		(e)			

Fonte: Do Autor (2020)

Figura 48 Rugosidade média nos tratamentos, sendo que os pontos representam a Rugosidade Média e as barras em azul o intervalo de confiança de 95%



Fonte: Do Autor (2020)

A área testemunha não apresentou nenhum tratamento, e nenhuma cultura apresentou rugosidade média superior à cevada plantio direto e inferior ao feijão plantio direto. Vale ressaltar que a área testemunha não teve tráfego de máquinas, e, pela diferença do manejo, o sistema plantio direto e um tráfego menor de máquinas do que o sistema convencional (SKAALVEEN et al., 2019). Sendo assim, mesmo o tráfego de máquinas podendo aumentar a compactação do solo e diminuir a rugosidade do solo, a raiz do feijão no plantio direto foi forte o suficiente para vencer as barreiras do solo e aumentar a rugosidade média da área, quando comparada a área testemunha. Para a raiz da cevada no plantio direto, por apresentar uma estrutura mais rasa apresentou uma rugosidade média inferior quando comparada à área testemunha. Já a área testemunha apresentou rugosidade média superior à rugosidade média das culturas no plantio convencional, fato esse explicado que, mesmo tendo o revolvimento da área arada, a compactação do solo ainda existe pelo tráfego das máquinas na superfície, pois na área testemunha, não houve tráfego de máquinas. Vale ressaltar também, que a atividade do arado praticamente interrompe a diferença da cultura, por isso a diferença ao comparar a área testemunha com arado convencional e plantio direto.

Sasal et al., (2017), ao estudarem o plantio direto dos pampas úmidos do norte da Argentina e seu impacto no escoamento superficial de água, relatou que nesse sistema de cultivo houve a formação de uma

estrutura na superfície do solo chamada de “platy”, o que facilitava a compactação do solo. Essa estrutura é identificada no sistema plantio direto e não no sistema convencional, porque no sistema convencional há o revolvimento da camada superficial do solo, enquanto no plantio direto não (ALVAREZ et al., 2014; BOIZARD et al., 2013). Entretanto, Skaalsveen et al., (2019) ao estudarem as propriedades estruturais do solo na retenção e purificação de água nos sistemas de cultivo plantio direto e convencional, identificaram que as propriedades estruturais do solo costumam ser mais pobres no plantio direto, aumentando a compactação da camada superior, redução da porosidade e alta densidade causada pela ausência de inversão dessa camada. No entanto, vários estudos mostraram que a estrutura no solo no plantio direto poderia ter uma melhora considerável com a introdução de plantas com raízes grossas e profundas para mitigar problemas com a compactação. Fato esse observado nesse estudo, no qual foi verificado a potencialidade da raiz de feijão no aumento da rugosidade média do solo no sistema plantio direto comparado à cevada no mesmo sistema e a área testemunha. Além, de praticamente ter tido a interrupção dessa diferença entre as plantas quando praticado o cultivo convencional, pela atividade do arado.

Para os valores de caracterização da rugosidade do solo extraídos pelo semivariância, também foi feito um teste ANOVA bilateral com valor-p equivalente a 0,55. Sendo assim, como valor-p foi maior que 0,05, nota-se que não houve diferença significativa com a semivariância entre os tratamentos sendo a significância de um teste estatístico determinada pela relação sinal/ruído, podendo-se considerar que o tamanho das diferenças para os dados da semivariância foi pequeno ou que as medições foram muito variáveis. Sendo assim, o semivariograma não foi sensível para diferenciar a condição da rugosidade do solo entre os diferentes tratamentos. Entretanto, como proposto por Barreto et al., 2019, o semivariograma funcionou como um indicador de presença de crosta, como mostra a Figura 51 (e) o semivariograma destacando em vermelho as linhas iluminadas que apresentaram baixa variação espacial e, conseqüentemente, o indicativo de crosta e Figura 46 (f) identificação dessas linhas na área amostrada.

6 CONCLUSÕES

O equipamento óptico desenvolvido robusto, de baixo custo aplicável a campo para caracterizar a rugosidade superficial do solo e presença de crosta no solo mostrou-se válido e com resultados confiáveis.

As técnicas utilizadas como referência, rugosímetro de varetas para área de *Compost Barn* e SfM para área de erosão não tiveram relação com os dados provenientes do equipamento desenvolvido. Porém também apresentaram falhas para a caracterização da rugosidade superficial. Sendo assim, as técnicas utilizadas como referência também não foram precisas.

O filtro verde adicionado na frente da câmera do equipamento foi válido ao facilitar o processamento de imagens na limpeza das impurezas presente na imagem, nas quais dificultavam a identificação da linha do laser.

O teste da validação do equipamento desenvolvido mostrou-se válido ao conseguir separar os solos de diferentes manejos e culturas quanto as condições da rugosidade. Porém, o semivariograma não foi sensível o suficiente para fazer essa separação, sendo este apenas um indicativo de presença de crosta.

O equipamento mostrou-se promissor para a caracterização da rugosidade superficial e novas pesquisas podem ser realizadas para aprimorar seus resultados e aplicabilidade em campo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERA-VEGA, F., CARVAJAL-RAMÍREZ, F., MARTÍNEZ-CARRICONDO, P., LÓPEZ, J.S-H., MESAS-CARRASCOSA, F.J., GARCÍA-FERRER, A., PÉREZ-PORRS, F. Reconstruction of extreme topography from UAV **Togrammetry. Measurement** , v. 121, p. 127-138, 2018.

AGUIRRE, A. M et al. Evolution of Terrestrial Laser Scanner and Structure from Motion photogrammetry techniques for quantifying soil surface roughness parameters over agricultural soil. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.45 I. 3, 605-621, 2019.

ALLMARAS, R. R.; BURWELL, R. E. & HOLT, R. F. Plow-layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. **Soil Science Society America Proceeding**. v.31, 1967.

ALMEIDA, W. S.; CARVALHO, D. F.; PENACHUKI, E.; VALIM, C. W., RODRIGUES, A. S.; VARELLA, C. A. A. Erosão Hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1110-1119, 2016.

AMARO, V. E.; SANTOS, A. L. S.; SCUDELARI, A. C.; COSTA, B. C. P. Use of terrestrial-LiDAR for quantifying morphological changes in Ponta Negra Beach, Natal city, Northeast Brazil. **In: CoastGIS 2013 Conference: Monitoring and Adapting to Change on the Coast**, 2014.

APPEANING ADDO, K.; WALKDEN, M.; MILLS, J. P. Detection, measurement and prediction of shoreline recession in Accra, Ghana. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.63, p.543-558, 2008.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Agregação de um Nitossolo Vermelho Distroférrico sob sistemas de plantio direto, preparoconvencional e mata nativa. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1,p. 58-66, 2010

ASSOULINE, S. Rainfall-induced soil surface sealing: a critical review of observations, conceptual models, and solutions. **Vadose Zone Journal**, Austin, v. 3, p. 570-597, 2004.

AUZET, A. V., BOINFFIN, J.; PAPY, F.; LUDWIG, B.; MAUCORPS, J. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. **Catena**, Amsterdam, v. 19, p. 1-22, 1995.

BADORRECH A, Gerke HH, Hüttl RF. Morphology of physical soil crusts and infiltration patterns in an artificial catchment. **Soil Till Res.** v .129, p. 1-8, 2013.

BANDEIRA, D. H. Estudo da rugosidade superficial do solo para diferentes tipos de cobertura e sistemas de manejo do solo. **Tesis do Programa De Doctorado En Investigación Agraria Y Florestal**, Universidade da Corunã, 2019.

BARBEREG, A. E.; ENDRES, M. I.; SALFER, J. A.; RENEAU, J. K. Performance and Welfare of Dairy Cows in an Alternative Housing System in Minnesota. **Journal of Dairy Science**, v. 90, n. 3, p. 1575-1583, 2007.

BARRETO, B. B.; SIQUEIRA, R. H. S.; RIVERA, F. P.; BRAGA, R. A.; FERREIRA, M. M. HORGAN, G. Deselopment of na optical techniqe for characterizing presence of soil surface crust. **Computers and Eletronics in Agriculture**. Vv. 167, p. 105050, 2019.

BAUDER, J.W.; RANDAL, G.W.; SWAN, J.B. Effect of four continuous tillage system on mechanical impedance of a clay loam soil. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.45, p.802-6, 1981.

BERTOL, I.; PAZ GONZÁLEZ, A.; VIDAL VÁZQUEZ, E. Relations of soil surfasse roughness with the rainfall volume and watter aggregate satability. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, p. 543-553, 2006.

BERTOL, I; GONZÁLES, A. P; VÁZQUEZ, E.V. Rugosidade superficial do solo sob diferentes doses de resíduos de milho submetido à chuva simulada. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília**, v.42, n.1, p.103-110, 2007.

BERTONALI, F. C.; GONZALES, A. P.; LIÑARES, M. L. VÁZQUEZ, E. V.; MIRANDA, J. G. V. Variabilidade especial da rugosidade superficial do solo medida com rugosímetros de agulhas e laser. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 59, p. 227-234, 2000.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo. P. 355, 2005.

BLACK, R. A.; TARABA, J. L; DAY, G. B.; DAMASCENO, F. A.; BEWLEY, J. M. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 12, 8060-74, 2013.

BOLLER, W.; GAMERO, C. A.; PEREIRA, J. O. Avaliação de diferentes sistemas de prepare e de condições de cobertura do solo. **Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, SP**, v.17, n.2, p.52-63, 1997.

BOIZARD, H.; YOON, S. W.; LEONARD, J.; LHEUREUX, S.; COUSIN, I.; ESTRADE, J. R.; RICHARD, G. Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage. **Soil Tillage Research**. v. 127, p. 34-44, 2013.

BURWELL, R. E.; LARSON, W. E. Infiltration as influenced by tillage induced random roughness and pored space. **Soil Science Society Proceedings**. V.33, p. 449-452, 1969.

CÂMERA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V.29, n.50Viçosa, MG, 2005.

CANDURA, G.; CASELLA, A.; SARCINELLI, S. Prove di lavrazione meccanica del terrano a profundita variable. **Vol. 1. Parte seconda Annata1955 – 1956, Atti del Centro Nazionale Meccanico Agricolo**, Torino, p.107-131, 1957.

CARVALHO, J. J.; AZEVEDO, C. A. V.; HENRIQUE, J.; DANTAS, N. J.; LIMA, V. L. A.; PORDEUS, R. V. Variabilidade espacial e temporal da seção transversal de escoamento superficial em sulcos de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v.7, n.1, p.13, 2007.

CASTILHO, Ataliba T. de. Nova Gramática do Português Brasileiro. **Editores Contexto**. São Paulo. p. 768, 2010.

CASTRO, L. G., COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo prepare e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. Viçosa, MG, v.30, p.339-352, 2006.

CORREA, I. M. C. et al. Rugosidade da superfície de um Camissolo Húmicorelacionada com o preparo e compactação do solo sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 2, p. 567-576, 2012.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CEPIK, C. T. C.; DEBIASI, H. Demanda de tração em haste sulcadora na integração lavourapeçuária com diferentes pressões de ástejo e sua relação com o estado de compactação do solo. **Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, SP**, v.27, n.1, p.220-228, 2007.

DARBOUX F, LE BISSONNAIS Y. Changes in structural stability with soil surface crusting: consequences for erodibility estimation. **Europ Jour Soil Sci.** 58: 1107-1114, 2001.

DAMASCENO, F. A. Compost bedded pack barns system and computational simulation of airflow through naturally ventilated reduced model. p 391, 2012.

DANDOIS, J.P., ELLIS, E.C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. **Rem. Sens. Environ.** v.136, p.259–276, 2013.

DARBOUX, F., DAVY, P., GASCUEL-ODOUX, C., HUANG, C. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments. **CATENA.** v.46, p.125–139, 2002.

DE MARIA, L. V. de; STORINO, M.; CASTRO, O. M. de. Equipamento com sensor a laser para medida da rugosidade da superfície do solo. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO.** Ribeirão Preto. **Anais...** Botucatu: Ed. UNESP, v. 1, p. 1-3, 2003.

DEL RIO, J. L.; LÓPEZ DE ARMENTIA, A. M.; ÁLVAREZ, J. R.; FERRO, G.; BÓ, M. J.; MARTÍNEZ ARCA, J.; CAMINO, M. A. Shoreline Retreat the Gulf San Matias. **Thalassas – An International Journal of Marine Sciences.** Argentina, v.23, n.2, p.43-51, 2007.

DEXTER, A. R. Effect of rainfall on the surface micro-relief soil. **J. of Terramech.** v.14, n.1, p.11-22, 1997.

ELTZ, F. L. F.; NORTON, L. D. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage, and canopy cover. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 61, p. 1746-1755, 1997.

FAVALLI, M.; FORNACIAI, A.; ISOLA, I.; TARQUINI, S. & NANNIPIERI, L. 2012. Multiview 3D reconstruction in geosciences. **Geosciences.** v.44, p.168-176.

FAO. World's 2030 goals put hunger and agriculture at the center of a global policy. **Food and Agriculture Organization of the United Nations,** 2015.

FISHER, RONALD A. The Design of Experiments. **Macmillan.** 9ª ed. 1935.

FONSTAD, M.A., DIETRICH, J.T., COURVILLE, B.C., JENSEN, J.L., CARBONEAU, P.E. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. **Earth Surf. Process. Landf.** 38, 421–430, 2013.

FOX, D. M.; BRYAN, R. B.; FOX, C. A. Changes in pore characteristics with depth for structural crusts. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 1/2, p. 109-120, May 2004.

FOX, D. M.; LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. The effect of ponding depth for structural crusts. **Catena**, Amsterdam, v. 32, p. 87-100, 1998.

FREDE, H. G.; GATH, S. Soil Surface Roughness as the Result of Aggregate Size Distribution 1. Report: Measuring and Evaluation Method. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science.** v. 15, p. 31-35, 1995.

GACHET, P., GEISER, F., LALOI, L., VULLIET, L. Automated digital processing for volume change measurement in triaxial cells. **Geotech**, v.30, p. 98-103, 2006.

GARGIA, M. R., DIAZ, A. M. C., TARQUIS, A. M., PAZ, G. A., SAA, R. A. Shadow analysis of soil surface roughness compared to the chain set method and direct measurement of micro-relief. **Biogeosciences.** v. 7, p. 2477-2487, 2010.

GASCUEL-ODOUX, C.; BRUNEAU, P. A morphological assessment of soil microtopography using a digital elevation model on one square metre plots. **Catena.** v.17, p.315-325, 1990.

GIARDEAU, D. M.; CloudCompare: Point cloud processing workshop. **Stuttgart.** Germany. 2019.

GILLIOT, J.M., VAUDOUR, E., MICHELIN, J. Soil surface roughness measurement: A new fully automatic photogrammetric approach applied to agricultural bare fields. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.134, p.63-78, 2017.

GHOSH, M. K.; KUMAR, L.; ROY, C. Monitoring the coastline change of Hatiya Island on Bangladesh using remote sensing techniques. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 101, p. 137-144, 2015.

GUZHA, A. C. Effects of tillage on soil microrelief, surface, depression storage and soil water storage. Department of Land and Water Resources Management, Midlands State University, Post Bag 9055, Gweru, Zimbabwe. **Soil and Tillage Research.** Vol. 76, p. 105-114, 2004.

HARRAL, B. B. and COVE, C. A. Development of an optical displacement transducer for the measurement of soil surface profiles. **Journal Agricultural Engineer Research**. v.27, p.421-429, 1982.

HELMING, K.; JESCHKE.; STORL, J. Surface reconstruction and change detection for agricultural purposes by close range photogrammetry, **Commission V**, p. 610-617, 1991.

HENG, B.C.P; CHANDLER J.H; ARMSTRONG, A. Applying close range digital photogrammetry in soil erosion studies. **The Photogrammetric Record** 25(131): 240–265, 2010.

HU, X. et al. Development of soil crusts under simulated rainfall and crust formation on a loess soil as influenced by polyacrylamide. **Pedosphere**, Amsterdam, v. 22, p. 415-424, June 2012.

HUANG, C. Quantification of soil microtopography and surface roughness, in: *Fractals in Soil*, edited by: Baveye, P., Parlange, J. Y. and Stewart, B. A., **Science**, 377pp, 1998.

IVANOV, N.; BOISSARD, P.; CHAPRON, M. & ANDRIEU, B. Computer stereo plotting for 3-D reconstruction of a maize canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.75, p.85–102, 1995.

JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond k-means. **Pattern Recognition Letters**. V. 31, I. 8, p. 651-666, 2010.

JAMES, M.R., ROBSON, S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. **J. Geophys. Res.** 117, F03017, 2012.

JAMES, M.R., ROBSON, S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. **Earth Surf. Process. Landf.** V.39, p. 1413–1420, 2014.

JANNI, K. A.; ENDRES, M. I; RENEAU, J. K.; SCHOPER, W. W. Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 23, n. 1, 97-102, 2007.

JESTER, W., Klik, A. Soil surface measurement – methods, applicability, and surface representation. **Catena**. v. 64, p. 174-192, 2005.

KADER, N. A. E., ROBIN, P., PAILLAT, J. M., LETERME, P. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. **Bioresour Technol**, 2007.

KAMPHORST, E. C. et al. Predicting depression storage from soil surface roughness. **Soil Science of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1749-1758, 2000.

KASSAN, A.; DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T. Global achievements in soil and water conservation: the case of conservation agriculture. **Soil Water Conservation**. v.2, p. 5-13, 2014.

Kendall, M. G. A New Measure of Rank Correlation. **Biometrika**. v.30, n.1-2, p. 81-93, 1938.

KINNEL, P. I. A. Raindrop impact induced erosion processes prediction: a review. **Hydrological Processes**, Aberdeen, v. 19, p. 2815-2844, Sept. 2005.

KUIPERS, H. A relief meter of soil cultivation studies. **Neth. Journal Agricultural Science**. v.5, p.255-262, 1957.

LADO, M.; BEN-HUR, M. Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 24, n. 3-4, p. 209-224, Feb. 2004.

LAKSHMIKANTHA, M. R.; PRAT, P.C.; LEDESMA, A. Image analysis for the quantification of a developing crack network on a drying soil. **Geotech**, v. 32, n.6, p. 505-515, 2009.

LANÇAS, K. P. Tráfego, tração e compactação: otimização de desafios. In: **XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do solo**, Gramado, RS, p.43, 2007.

LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. Crust micromorphology and runoff generation on silty soil materials during different seasons. **Catena**, Amsterdam, v. 24, p. 1-16, 1993.

LEVIEN, R.; GAMERO, C. A.; FURLANI, C.E.A. Preparo convencional e reduzido em solo argiloso em diferentes condições de cobertura de inverno. **Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, SP**, v.23, n.2, p.277-289, 2003.

LEWIS, T. D., Assessing the significance of soil erosion for arable weed seedbank diversity in agroecosystems. **Progress in Physical Geography**, Dundee, 2013.

LI, J.H.; ZHANG, L.M. Geometric parameters and REV of crack network in soil. **Geotech**, v.37, n.4, p. 466-475, 2012.

LI, Z.; CHEN, Z.; Comparing two measuring methods of soil microtopography. First International Conference on Agro – **Geoinformatics**. 2012.

LINO, A. C. L. Técnica óptica de Moiré visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, p. 85, 2002.

MACHADO, R. L. T.; MACHADO, A. L. T.; TURATTI, A. L.; REIS, A. V. E ALONÇO, A. S. Avaliação do desempenho de escarificador em planossolo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, RS, v.2, n.3, p.151-154, 1996.

MARTINEZ-AGUIRRE, A.; ÁLVAREZ-MOZOZ, J.; GIMÉNEZ, R. Evaluation of surface roughness parameters in agricultura soils with different tillage conditions using a laser profile meter. **Soil and Tillage Research**. v.162, p. 19-30, 2016.

MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil propriets and fitting them to sampling estimates. **Journal Soil Science**. v.37, p.617-639, 1986.

MCKENZIE, B. M.; BRAGA, R. A, COELHO, D. E. C.; KROL, M., HORGAN, G. W. Moiré as a low-cost, robust, optical-technique to quantify soil surface condition. **Soil Tollage Research**. v.158, p. 147-155, 2016.

MENTEN, G.H.; NEARING, M.A.; BORGES, A.L.O.; Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills. **Soil Science Society of America Journal**, Madison v.65, p.861-868, 2001.

MELLO, R. C. Alterações físicas em um latossolo Roxo em função da velocidade de aração e do ângulos horizontal dos discos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, PR, v.26, n.1, p.35-40, 2004.

MESSERKLINGER, S., SPRINGMAN, S. M., Local radial displacement measurements of soil specimens in a triaxial test apparatus using laser transducers. **Geotech**, v.30 n.6, p. 1-12, 2007.

MORAES, M. V. A. Monitoramento e avaliação de processos erosivos marginais em reservatórios de usinas hidrelétrcias por meio de varredura a laser. **Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia**, SP. 2016.

MORGAN, R.P.C. Erosión y conservación del suelo. **Madrid: Ediciones Mundi-Prensa**. p. 343, 1997.

PAIVA, C.T.C. Cultivo de milho em plantio direto e convencional com Diferentes doses de adubação nitrogenada em Cobertura, **Universidade Federal do Acre**, Rio Branco, 2011.

PAZ, A. G.; TABOADA, M. T. Medida del micro relieve del suelo y estimación de la retención hídrica en depresiones de la superficie. **Jornal de la Sociedad Española de Geomorfología**, La Coruña, v. 34, p. 829-841, 1996.

PEARSON, K., & GIBSON, Winifred. Further Considerations on the Correlations of Stellar Characters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. LXVIII, p. 415–448, 1907.

PENACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T., SOUZA, C. M. A. de URCEL, M.A. Rugosidade da superfície do solo sob diferentes sistemas de manejo e influenciada por chuva artificial. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.34, p.443-451, 2010.

PIERMATTEI, L.; CARTURAN, L.; GUARNIERI, A. Use of terrestrial photogrammetry based on structure from motion for mass balance estimation of a small glacier in the Italian Alps, **Earth Surf. Processes Landforms**. v.40, p.1791–1802, 2015.

PONTES, L. M.; SILVA, M. L. N.; ELISEI, L. G.; BISPO, D. F. A. B.; CARVALHO, A. M. S. Monitoramento das perdas de solo e água por erosão hídrica, na Sub-bacia das Pesses, Extrema, MG. **In XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, Natal RN. 2017.

PORTUGAL, A. F. et al. Alterações em propriedades físicas do solo em ecossistemas de floresta após a implantação de pastagem no extremo oeste do Acre. In: ARAÚJO, E. A.; LANI, J. L. **Uso sustentável de ecossistemas de pastagens cultivadas na Amazônia Ocidental**. Rio Branco: SEMA, p. 142, 2012.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: foundation for statistical computing**. Vienna, 2008.

RAMOS, J. C. Cobertura e rugosidade da superfície na proposição de indicadores de qualidade de um Cambissolo Húmico relacionados ao controle da erosão hídrica. **Tese de Doutorado Universidade de Santa Catarina**, 200p, 2015.

RASBAND, W. S. **Image J**. Bethesda: National Institutes of Health, 2004.

RAZALI, N. M.; WAH, Y. B.; Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**. v2, n.1, p.21-33, 2011.

RIBEIRO, E. Digitalização da coluna por meio da visão monocular com projeção de luz estruturada. **Tese (doutorado em Engenharia Agrícola)** – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.

RIBEIRO, K. M. ; BARRETO, B. ; PASQUAL, M. ; WHITE, P. J. ; BRAGA, R. A. ; DUPUY, L. X. . Continuous, high-resolution biospeckle imaging reveals a discrete zone of activity at the root apex that responds to contact with obstacles. **Annals of Botany**. v. 3, p. 555-563, 2013.

ROMERO, E. N. et al. The application of terrestrial laser scanner and SfM photogrammetry in measuring erosion and deposition processes in two opposite slopes in a humid badlands areas (central Spanish Pyrenees). **Soil**, v.1, 561-573, 2015.

RÖMKENS, M. J. M. The soil erodibility factor: a perspective In: S. A. El-Swaify, W. C. Moldenhauer, & A. Lo (Eds.), Soil erosion and conservation. Ankeny, Iowa, **USA: Soil Conservation Society of America**. p.445-461, 1985.

ROSA, D. P. Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificações e compactação. **Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo)** – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

SAJJADI SA, MAHMOODABADI M. An Aggregate breakdown and surface seal development influenced by rain intensity, slope gradient and soil particle size. **Solid Earth**. 6: 311-321, 2015.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R Cultivo mínimo. Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/canade>>acucar/arvore/CONTAG01_85_22122006154841. 2007.

SANCHEZ, M.; ATIQUE, A.; KIM, S.; ROMERO, E.; ZIELINSKI, M. Exploring desiccation cracks in soil using a 2D profile laser device. **Acta Geotechnical**, v.8, 583-596, 2013.

SASAL, M. C.; BOIZARD, H. ANDRIULO, A. E.; WILSON, M. G.; LEONARD, J. Platy Structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. **Soil and Tillage Research**. v.173, p. 33-41, 2017.

SHANE, E. M., ENDRES, M. I., JANNI, K. A. Alternative Bedding materials for Compost Bedded Pack Barns in Minnesota: A Descriptive Study. **Applied Engineering in Agriculture**. v. 26, p. 171-179, 2010.

SHRESTHA, R. L.; CARTER, W. E.; SARTORI, M.; LUZUM, B. J.; SLATOON, K. C. Airborne Laser Swath Mapping: Quantifying Changes in Sandy Beaches over Time Scales of Weeks to Years. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. V.59, p. 222-232, 2005.

SILVA, A.; SOUZA FILHO, E. E. de; NEVES, S. M. A. S. Erosão marginal e sedimentação no rio Paraguai no município de Cáceres (MT). **Revista Brasileira de Geociências**. V.41, n.1, p.76-84, 2011.

SIQUEIRA, A. G.; AZEVEDO, A. A.; SOUZA, L. A. P. de; SILVA, M. Modificações fluviais à jusante de Barragens. In 14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. RJ, Brasil. **Anais do 14º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia e Ambiental**, 2013.

SKAALSVEEN, K.; INGRAM, J.; CLARKE, L. E. The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in north-western Europe: A literature review. **Soil Tillage Research**. v. 189, p.98-109, 2019.

SOUZA, E. S. et al. Effect of crusting on the physical and hydraulic properties a soil cropped with Castor beans (*ricinuscommunis L.*) in the northeastern region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 141, n. 8, p. 55-61, Aug. 2014.

SPEARMAN, C. The Proof and Measurement of Association Between Two Things. **The American Journal of Psychology**. v.15, n.1, p.72–101, 1904.

SPAROVEK, G. Erosão do solo e a produtividade das culturas., 13, 1996.

THOMSEN, L. M., BAARTMAN, J. E. M., BARNEVELD, R. J., STARKLOFF, T., STOLLE, J. Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in soil erosion model. **Soil Journal**. p. 399-410, 2015.

TOWNSED, T.J.; RAMSDEN, S. J.; WILSON, P. How do we cultivate in England? Tillage practices in crop production systems. **Soil Use Management**., v.32, p. 106-117, 2016.

ULLMAN, S. The interpretation of structure from motion: **Proceedings of the Royal Society of London B**, v.203, p.405-426, 1979.

VALENTIN, C.; BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 55, p. 225-245, 1995.

VÁZQUEZ, E. V.; GONZÁLEZ, A. P. Consideraciones sobre la evolución de la rugosidad y el cálculo de la retención de agua en microdepressiones. Universidad Nacional Del Nordeste, **Comunicaciones Científicas y Tecnológicas**, La Coruña, Campus de La Zapateira, La Cruña, Espanha, p. 203-208, 2003.

VÁZQUEZ, E. V.; MIRANDA J.G.V.; GONZÁLEZ, A. P. Describing soil surface microrelief by crossover length and fractal dimension. **Nonlin Processes Geophys.** 14, 223-235, 2007.

VÁZQUEZ, E. V.; VIEIRA, S. R.; DE MARIA, I. C. & GONZÁLEZ, A. P. Geostatistical analysis of microrelief of an oxisol as a function of tillage and cumulative rainfall. **Scientia Agricola** v.66, n.2, p.225-232, 2009.

VIDAL, E. V.; VIEIRA, S. R.; DE MARIA, I. C.; GONZALEZ, A. P.; Fractal dimensions and geostatistical parameters for soil microrelief as function of cumulative precipitation. **Scientia Agricola**, v. 67, p.78-83, 2010.

VIVAS MIRANDA, J. G. Análisis fractal del microrelieve del suelo. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad da Coruña. **A Coruña**. 313p, 2000.

VIVAS, P. GONÇALVES. Uso do biospeckle como ferramenta de diagnóstico precoce na avaliação da qualidade de sementes de café. **Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Lavras**, 2014.

WAGNER, L. E.; YIMING, YU. Digitization of profile meter photographs. Trans. **American Society Agricultural Engineers**. v.34, n.2, p. 412-416, 2000.

WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N.F., HAMBREY, M. J., REYNOLDS, J. M., Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**. v. 179, p. 300-314, 2012.

WOODGET A. S; CARBONNEAU P. E; VISSER F, MADDOCK I. P. Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. **Earth Surf Process Landforms**. 40(1):47–64, 2015.

YOSHIDA, S.; HALLETT, P. D. Impact of hydraulic suction history on crack grow mechanics in soil. **Water Resources Research**, Oxford, v. 44, n. 5, May 2008. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007WR006055/full>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

ZIELINSKI, M.; SÁNCHEZ, M.; ROMERO, E.; ARIQUE, A.; Precise observation of soil surface curling. **Geoderma**, v. 85, p. 226-227, 2014.

ZOLDAN JUNIOR, W. A. Rugosidade superficial do solo ocasionada por uma operação de escarificação aplicada após cinco anos e meio de uso de sistemas de manejo do solo, e suas relações com a erosividade da chuva e erosão hídrica em um Nitossolo Háplico. 2006. 100 p. **Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)**, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2006.

ANEXO A – IDENTIFICAÇÃO DAS COORDENADAS X, Y, Z

```

%
pkg load image
clear all
close all
page_screen_output(0)
page_output_immediately(1)
addpath(genpath('lib-mcode'))

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SÃ³ modifica aqui-
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ENDN=38;
INITN=0;
REFIMAGE='0a.bmp';
DIRIMAGES='C:\Users\CEDIA\Desktop\Bianca\Compost Barn Novo\Compost Barn \Compacted\20\';

OUTPUTDIR='output3dpoint';
outdatafile=fullfile(OUTPUTDIR,'datxyz.dat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mkdir(OUTPUTDIR);

IMG_REF = imread(fullfile(DIRIMAGES,REFIMAGE));
IMG_REF =function_check_binary_image(IMG_REF);
if (size(IMG_REF,3)==3)
    IMG_REF=IMG_REF;
endif

```



```

figure(2);
[X Z]=R.calculates_points();
print(gcf,fullfile(OUTPUTDIR,['img_' num2str(II) '.png'],'-dpng');

Y=(II-INITN)*ones(size(X));

if(II==INITN)
    XX=X';
    ZZ=Z'-polyval(P,X');
    YY=Y';
else
    XX=[XX;X'];
    ZZ=[ZZ;Z'-polyval(P,X')];
    YY=[YY;Y'];
endif

DATAPART=[X',Y',Z'-polyval(P,X')];
datafile=fullfile(OUTPUTDIR,['dataxyz' num2str(II) '.dat']);
fprintf(stdout,'\nSaving DATA in:%s\n',datafile);
save ('-ascii',datafile, 'DATAPART');
fprintf(stdout,'DATA saved [OK]\n',datafile);

end

fprintf(stdout,'\nSaving DATA in:%s\n',outdatafile);
DATA=[XX,YY,ZZ];
save ('-ascii',outdatafile, 'DATA');
fprintf(stdout,'DATA saved [OK]\n',outdatafile);

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%% dados :
```

```
%% outdatafile
```

```
%% OUTPUTDIR
```

```
DATA=load(outdatafile);
```

```
FATOR=[5.0/150 1 0.1];
```

```
plot_teste_multiple(DATA,OUTPUTDIR,FATOR);
```

ANEXO B – Caracterização da rugosidade

```
%  
  
clear all  
  
addpath(genpath('mfiles'))  
  
FILENAME='...\dataxyz.txt';  
OUTPUTDIR='output';  
FATOR=[5.0/150 1 0.1];  
D=1,5;  
ENABLE_PLOT=false;  
  
%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%  
  
mkdir(OUTPUTDIR);  
  
DATARAW=load(FILENAME);  
DATA=DATARAW.*FATOR;  
  
[RR MEAN]=func_calc_rugosidade(DATA,D,ENABLE_PLOT);  
  
plot_teste_multiple([DATA(:,1) DATA(:,2) RR],OUTPUTDIR)  
  
outdatafile=fullfile(OUTPUTDIR,'rugosidade.dat');  
save('-ascii',outdatafile,'RR');  
  
outdatafile=fullfile(OUTPUTDIR,'rugosidade-mean.dat');  
save('-ascii',outdatafile,'MEAN');
```

ANEXO C – Identificação de presença de crosta

```
%  
clear all  
close all  
  
DAT.LINEWIDTH=2;  
DAT.MARKERSIZE=5;  
DAT.FONTSIZE=12;  
  
OUTPUTDIR='output'  
  
ENABLE_PLOT_INTERPOLATE=false;  
  
addpath(genpath('lib-mcode/variograma'))  
  
[fname, fpath, fltidx] = uigetfile ({ '*.dat', 'Select *.dat files with curves'}, 'MultiSelect', 'on');  
  
N=length(fname);  
VARS=cell(N,1);  
LEN_VARS=zeros(N,1);  
  
mkdir(OUTPUTDIR);  
  
for II=1:N  
    DATOS=load(fullfile(fpath,fname{II}));  
    X=DATOS(:,1);  
    Z=DATOS(:,3);
```

```

XX=[min(X):1:max(X)];
ZZ = interp1 (X,Z,XX);

if(ENABLE_PLOT_INTERPOLATE==true)
    figure(1)
        plot_interpolate_lines(X,Z,XX,ZZ,II,fname,OUTPUTDIR,DAT);
endif

[V DIFF]=funcvariograma(ZZ);
VARS{II}=V;

LEN_VARS(II)=length(V);

fprintf(stdout,"Working sample:%4d of %4d\r",II,N);
end
disp("");

MALL=min(LEN_VARS);
M=round(MALL/3); %%% quanto vou a variacionar 1/3 del ancho de la foto
VARS_MAT=zeros(N,M);
for II=1:N
    VARS_MAT(II,:)=VARS{II}(1:M);
endfor

figure
plot_variogram_curves(VARS_MAT,OUTPUTDIR,DAT);

```

```
[curves1, curves2, IDG,c1,c2]=func_kmeans2(VARS_MAT);
```

```
figure
```

```
plot_2_curve_blocks(curves1,curves2,c1,c2,OUTPUTDIR,DAT);
```

```
Vvalue=mean(max(VARS_MAT))
```

```
save (fullfile(OUTPUTDIR,'Vvalue.txt'), "Vvalue")
```