

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA**

RICARDO KWIATKOWSKI DA SILVA

**ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO DO MILHO POR MEIO DO
PROCESSAMENTO DE IMAGENS OBTIDAS A PARTIR DE AERONAVE
REMOTAMENTE PILOTADA**

PONTA GROSSA

2021

RICARDO KWIATKOWSKI DA SILVA

**ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO DO MILHO POR MEIO DO
PROCESSAMENTO DE IMAGENS OBTIDAS A PARTIR DE AERONAVE
REMOTAMENTE PILOTADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, curso de Mestrado em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Selma Regina Aranha Ribeiro

**PONTA GROSSA
2021**

S586 Silva, Ricardo Kwiatkowski da
Análise do desenvolvimento do milho por meio do processamento de
imagens obtidas a partir de aeronave remotamente pilotada / Ricardo
Kwiatkowski da Silva. Ponta Grossa, 2021.
109 f.

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada - Área de Concentração:
Computação para Tecnologias em Agricultura), Universidade Estadual de Ponta
Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Selma Regina Aranha Ribeiro.

1. Aerofotogrametria. 2. Modelo digital de terreno. 3. Nuvem de pontos. 4.
PEC-PCD. I. Ribeiro, Selma Regina Aranha. II. Universidade Estadual de Ponta
Grossa. Computação para Tecnologias em Agricultura. III.T.

CDD: 004



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 - Bairro Uvaranas - CEP 84030-900 - Ponta Grossa - PR - <https://uepg.br>

TERMO

TERMO DE APROVAÇÃO

Ricardo Kwiatkowski da Silva

ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO DO MILHO POR MEIO DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS OBTIDAS A PARTIR DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Ponta Grossa, 07 de dezembro de 2021.

Prof(a). Dra. Selma Regina Aranha Ribeiro (UEPG, Presidente)

Profa. Dra. Maria Salete Marcon Gomes Vaz (UEPG)

Prof. Dr. Claudionor Ribeiro da Silva (UFU/MG)



Documento assinado eletronicamente por **Selma Regina Aranha Ribeiro, Professor(a)**, em 19/01/2022, às 16:16, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Salete Marcon Gomes Vaz, Professor(a)**, em 24/01/2022, às 09:18, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Claudionor Ribeiro da Silva, Usuário Externo**, em 25/01/2022, às 17:02, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **0856255** e o código CRC **8CFFFBC6**.

Aos meus tios Lucas, Rosa, Ari e Diva Kwiatkowski

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Dr^a. Selma Regina Aranha Ribeiro pela oportunidade de pesquisa e por seus ensinamentos.

Aos Professores Dr. Claudionor Ribeiro da Silva, Dr^a. Maria Salete Marcon Gomes Vaz, Dr. José Carlos Ferreira da Rocha e Dr^a. Graziela Maziero Pinheiro Bini, por contribuírem com seus conhecimentos em minha dissertação.

Ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada pelas diretrizes, principalmente no período de suspensão das atividades presenciais devido as questões sanitárias relativas à pandemia do vírus SARS-CoV-2.

Aos colegas acadêmicos que de alguma forma contribuíram em minha pesquisa ou durante os trabalhos nas aulas presenciais.

Ao Geólogo Manoel Luís Dorigon Camlofski por seus ensinamentos em Geologia e Geodésia aplicada.

Ao meu pai, mãe e irmãos sempre presentes e pelo ambiente multidisciplinar que vocês proporcionam ao longo do tempo.

À Fundação Araucária e ao Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR).

RESUMO

O monitoramento agrícola é importante para antecipar informações sobre a produtividade ou produção e detectar problemas que venham a afetá-las. Uma forma de acompanhar o desenvolvimento de uma lavoura é monitorar seu crescimento e as mudanças que ocorrem nas plantas ao longo do seu ciclo fenológico. Obtém-se estas informações, comumente, a partir de medições manuais que apresentam limitações como escala, local de trabalho e demora na execução. Diante do exposto, apresenta-se o levantamento de dados em campo usando-se Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), popularmente conhecida como Drone. Por meio de um sensor remoto RGB de baixo custo embarcado no equipamento, pode-se coletar fotografias que depois de processadas geram arquivos digitais. Estes permitem a análise e a geração de informações de forma semelhante aos levantamentos manuais não apenas localmente, mas em uma área geográfica considerável. Realizaram-se os levantamentos aerofotogramétricos em diferentes datas do ciclo fenológico do milho por meio de uma RPA Mavic 2 Pro, equipada com a câmera L1D-20c. Para o processamento das fotos utilizou-se o programa *Agisoft Metashape*, por meio do qual geraram-se as nuvens de pontos, Modelo Digital de Terreno (MDT) e ortomosaicos. Calculando-se a diferença entre as nuvens de pontos e o MDT por meio da técnica *Compute cloud/mesh distance* do programa *CloudCompare*, obteve-se as alturas estimadas do dossel. Utilizando-se de transformações espectrais no programa *Agisoft Metashape*, calculou-se a separação solo/planta, que é necessária para analisar a cultura sem a influência do solo ou palha, existente em estádios iniciais. Analisou-se as nuvens de pontos por meio de estatística descritiva e os valores médios dos índices de vegetação, geraram informações sobre o estado em que se encontrava a cultura. As técnicas utilizadas proporcionaram a avaliação quantitativa e qualitativa das nuvens de pontos referentes a 5 estádios de desenvolvimento do milho, permitindo estimar o crescimento das plantas e acompanhar a dinâmica de evolução fenológica do dossel. A possibilidade da utilização de câmeras de baixo custo traz novas oportunidades de pesquisa e monitoramento agrícola.

Palavras-chave: Aerofotogrametria; Modelo Digital de Terreno; Nuvem de pontos; PEC-PCD.

ABSTRACT

Agricultural monitoring is important to anticipate information about productivity or production and detect problems that may affect it. One way to follow the development of a crop is to monitor its growth and the changes that occur in plants throughout their phenological cycle. This information is commonly obtained from manual measurements that have limitations such as scale, workplace and execution delay. Here we present the data collection in the field using Remotely Piloted Aircraft (RPA), popularly known as Drone. Through a low-cost RGB remote sensor embedded in the equipment, photographs can be collected that, after being processed, generate digital files. These allow the analysis and generation of information in a similar way to manual surveys not only locally, but in a considerable geographic area. Aerophotogrammetric surveys were carried out at different dates of the maize phenological cycle using an RPA Mavic 2 Pro, equipped with the L1D-20c camera. The Agisoft Metashape program was used to process the photos, through which point clouds, Digital Terrain Model (DTM) and orthomosaics were generated. By calculating the difference between the point clouds and the MDT using the Compute cloud/mesh distance technique of the CloudCompare program, the estimated canopy heights were obtained. Using spectral transformations calculated in the Agisoft Metashape program, the soil/plant separation was obtained, which is necessary to analyze the crop without the influence of soil or straw in early stages. The point clouds were analyzed using descriptive statistics and the average values of vegetation indices provided information about the state of the crop. The techniques provided the quantitative and qualitative evaluation of the point clouds referring to 5 stages of maize development, allowing the estimation of plant growth and the monitoring of the dynamics of the phenological evolution of the canopy. The possibility of using low-cost cameras brings new opportunities for agricultural research and monitoring.

Keywords: Aerophotogrammetry; Digital Terrain Model; Point cloud; PEC-PCD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva Sigmóide.....	19
Figura 2: Desenvolvimento fenológico do milho.....	20
Figura 3: Fatores que influenciam na produtividade.....	21
Figura 4: Espaço de cores RGB.....	23
Figura 5: Resoluções de uma imagem multiespectral digital de 8 bits	24
Figura 6: Aplicação da transformada linear em uma imagem 8 bits.....	26
Figura 7: Modelos RPA classe 3 de pequeno porte.....	29
Figura 8: Relação básica da geodéica por satélite.....	36
Figura 9: Etapas elementares de realização do método.....	43
Figura 10: Localização da área de estudo.....	44
Figura 11: Distribuição espacial e representação dos pontos de controle.....	46
Figura 12: Sequência do planejamento de voo.....	47
Figura 13: Interface do programa <i>DroneDeploy</i>	48
Figura 14: Imagem coletada pela RPA a 100 m de altura.....	49
Figura 15: Diagrama de processamento SfM-MVS das nuvens de pontos.....	50
Figura 16: Nuvem de pontos em perspectiva (Estádio R1).....	52
Figura 17: Seleção de pontos de interesse para análise.....	52
Figura 18: Recorte da nuvem para exportação em formato texto.....	52
Figura 19: Pontos de checagem para validação.....	54
Figura 20: Extração de pontos de checagem.....	55
Figura 21: Recortes A e B.....	57
Figura 22: Estrutura em árvore Octree.....	59
Figura 23: Cálculo da distância nuvem/malha.....	60
Figura 24: Exemplo de cálculo da distância nuvem/malha.....	60
Figura 25: Exemplo de índice de Vegetação aplicado a nuvem de pontos.....	61
Figura 26: Exemplo de separação solo/planta.....	62
Figura 27: Determinação de pontos de corte para o processo de filtragem.....	64
Figura 28: Diagrama: “Verificação do crescimento por meio da frequência”	67
Figura 29: Diagrama: “Estimativa da altura média do dossel”	67
Figura 30: Diagrama: Desenvolvimento em função dos índices de vegetação”	68
Figura 31: Diagrama: “Correlação entre crescimento e índices de vegetação”	69
Figura 32: Modelo Digital de Terreno.....	70

Figura 33: Estimativa de estágio fenológico inicial.....	72
Figura 34: Estimativa de estágio fenológico vegetativo posterior a V5.....	73
Figura 35: Estimativa de estágio fenológico vegetativo.....	73
Figura 36: Estimativa de estágio fenológico reprodutivo.....	74
Figura 37: Milho em estágio de desenvolvimento fenológico V3.....	75
Figura 38: Milho em estágio de desenvolvimento fenológico V6.....	76
Figura 39: Milho em estágio de desenvolvimento fenológico R1.....	76
Figura 40: Verificação do desenvolvimento da cultura.....	79
Figura 41: Desenvolvimento da cultura em estágio fenológico V3.....	81
Figura 42: Dinâmica temporal do dossel da cultura do milho.....	84
Figura 43: Realce de locais com baixo desenvolvimento das plantas.....	87
Figura 44: Índice GLI aplicado a nuvem de pontos.....	89
Figura 45: Índice NGRDI aplicado a nuvem de pontos.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplos de Índices de vegetação do visível.....	27
Quadro 2 - Classificação das RPAs e exigências de aeronavegabilidade.....	28
Quadro 3 - Comparação entre os sistemas GPS e GLONASS.....	37
Quadro 4 - PEC-PCD Planimétrico.....	39
Quadro 5 - PEC-PCD Altimétrico.....	39
Quadro 6 - Exemplo dos dados existentes em um arquivo texto.....	51
Quadro 7 - Fórmulas dos índices de vegetação.....	56
Quadro 8 - Exemplo de um arquivo após o cálculo da altura.....	65
Quadro 9 - Exemplo de um arquivo após o cálculo dos índices de vegetação.....	66
Quadro 10 - Verificação do crescimento por meio da frequência.....	66
Quadro 11 - Sistemática para estimativa da altura média do dossel.....	67
Quadro 12 - Desenvolvimento em função dos índices de vegetação.....	68
Quadro 13 - Correlação entre crescimento e índices de vegetação.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Levantamentos Aerofotogramétricos da cultura do milho.....	49
Tabela 2 - Cálculo da raiz do erro médio quadrático posicional em metros.....	71
Tabela 3 - Alturas estimadas do dossel da cultura medidas manualmente e computacionalmente.....	78
Tabela 4 - Índices médios de vegetação obtidos pela estatística descritiva.....	82
Tabela 5 - Correlações entre índices de vegetação e crescimento do milho.....	86

LISTA DE SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ASP	<i>American Society of Photogrammetry</i>
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
BIL	<i>Band Interleaved by Lines</i>
BIP	<i>Band Interleaved by Pixel</i>
BSQ	<i>Band SeQuential</i>
BVLOS	<i>Beyond Visual Line Of Sight</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CIE	<i>International Commission on Illumination</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CQFS	Comissão de Química e Fertilidade do Solo
CSI	<i>Char Soil Index</i>
DCT	<i>Discrete Cosine Transform</i>
DECEA	Departamento de Controle de Espaço Aéreo
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DJI	<i>Dà-Jiāng Innovations and Technology</i>
DNG	<i>Digital Negative</i>
DSG	<i>Diretoria do Serviço Geográfico</i>
EGSA	European Global Navigation Satellite Systems Agency
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FESCON	Fazenda Escola Capão Da Onça
FLSA	<i>Full Lambda Schedule Algorithm</i>
GLONASS	<i>Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>

GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IAC	<i>Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing</i>
IAF	<i>Índice de Área Foliar</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
JPEG	<i>Joint Photographic Expert Group</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NGBI	<i>Normalized Green Blue Index</i>
NGRDI	<i>Normalized Green Red Difference Index</i>
NIAG	NATO Industrial Advisory Group
GAI	Green Area Index
GLI	Green Leaf Index
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	Ground Sample Distance
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais
PDI	Processamento Digital de Imagens
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PZ-90	Parametry Zemli 1990
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RGBVI	<i>RGB Vegetation Index</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>

RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SENAR	<i>Serviço Nacional de Aprendizagem Rural</i>
SfM-MVS	<i>Structure from Motion- Multi-View Stereo</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UFPR	Universidade Federal do Paraná
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
VARI	<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>
VLOS	<i>Visual Line Of Sight</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 A CULTURA DO MILHO	18
2.2 IMAGENS DIGITAIS.....	22
2.2.1 Armazenamento de imagens.....	24
2.2.2 Transformações espectrais	25
2.3 AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA - RPA.....	28
2.3.1 Uso da RPA para levantamentos Aerofotogramétricos.....	30
2.3.2 Processamento Fotogramétrico	31
2.3.3 Restituição e obtenção de ortomosaicos.....	34
2.4 SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE.....	35
2.4.1 Métodos de Levantamento GNSS	37
2.4.2 Validação de Produtos cartográficos	38
2.5 TRABALHOS CORRELATOS	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 ÁREA DE ESTUDO	44
3.2 ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS.....	45
3.3 ETAPAS DE REALIZAÇÃO DO MÉTODO	46
3.3.1 Levantamento GNSS dos pontos de controle	46
3.3.2 Levantamento aerofotogramétrico.....	47
3.3.3 Geração das nuvens de pontos.....	50
3.3.4 Obtenção e validação do MDT	52

3.3.5 Análises por meio de índices de vegetação	55
3.3.6 Análise por meio das distâncias euclidianas no eixo Z.....	58
3.3.7 Filtragem de Dados	61
3.3.8 Recálculo dos índices de vegetação e Estatística Descritiva.....	65
3.3.9 Descrição sumária da sistemática de realização dos experimentos.....	66
4 RESULTADOS	70
4.1 VALIDAÇÃO DO MDT	70
4.2 VERIFICAÇÃO DO CRESCIMENTO PELA FREQUÊNCIA.....	71
4.3 ESTIMATIVA DA ALTURA MÉDIA DO DOSSEL.....	77
4.4 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO COMO INDICADOR DE DESENVOLVIMENTO.....	79
4.5 CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E CRESCIMENTO.....	85
4.6 ANÁLISES QUALITATIVAS	87
5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	91
REFERÊNCIAS.....	93
APÊNDICE A - OUTRAS VALIDAÇÕES.....	103
APÊNDICE B - PROCESSAMENTO DE DADOS GNSS.....	106

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é a atividade econômica mais importante exercida no Brasil. Além de fornecer alimento, traz divisas ao país por meio de exportações. Dentre as culturas utilizadas com o objetivo de comercialização internacional, temos o milho.

O milho é a segunda cultura mais semeada no mundo perdendo em produtividade e em área total ocupada apenas para a soja. É intensamente utilizado em estudos biológicos (YANG *et al.*, 2017) e sua produção mundial atualmente supera 1 bilhão de toneladas ao ano (FAO, 2019).

Por meio de estudos arqueológicos (RANUM; ROSAS; CASAL, 2014) e moleculares, verificou-se que o início do processo de cultivo do milho ocorreu entre 7000 e 9000 anos atrás no Vale do Rio Balsas, localizado no México. Nos dias de hoje, o interesse no cultivo da espécie *Zea Mays Ssp*, deve-se ao fato da importância que representa para o agronegócio.

Segundo dados da *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2019), a produção de milho no Brasil aumenta a partir da safra de 2007/2008, o que permite a manutenção contínua das exportações. Este fato recorrente no país, ao longo dos anos, deve-se ao crescimento da área plantada, que atualmente no país corresponde a 18,1 milhões de hectares (USDA, 2020).

Com o crescimento da área agricultável, ocorre o aumento da produtividade para atender a estrutura de comercialização do grão e seus subprodutos, principalmente ração para nutrição animal e produção de etanol (MOHANTY; SWAIN, 2019).

Devido a importância que o milho representa para a produção mundial de alimentos, faz-se necessário o desenvolvimento contínuo das técnicas de monitoramento das lavouras. Assim, novos conhecimentos podem ser incorporados ao manejo integrado ou utilizados para geração de informações sobre o estado da cultura.

Neste contexto, a tecnologia Aeronave Remotamente Pilotada (tradução para *Remotely Piloted Aircraft* - RPA) é utilizada para levantar dados que permitem monitorar e antecipar informações sobre a produção das lavouras ou problemas que venham a afetá-la.

As técnicas que se utilizam de equipamentos RPA para realização de imageamento terrestre, apresentam vantagens em detrimento de outros meios de

levantamento, pois permitem a obtenção de imagens com alta resolução temporal a baixo custo ou em datas em que o imageamento orbital é prejudicado pela presença de nuvens.

Especificamente em relação ao cultivo do milho, foram realizados estudos utilizando imagens da RPA para contagem digital de plantas (GNÄDINGER; SCHMIDHALTER, 2017), avaliação de efeitos causados pelo estresse hídrico ou a concentração de Nitrogênio (BUCHAILLOT *et al.*, 2019), estimativa de biomassa (CALOU *et al.*, 2019) e avaliação fenológica por meio de análises espectrais (HERRMANN *et al.*, 2019).

Conforme os autores citados, a tecnologia RPA pode subsidiar inúmeros estudos na área de agricultura. Desta forma, esta dissertação analisa o desenvolvimento do milho por meio da avaliação dos produtos gerados por fotogrametria e Processamento Digital de Imagens (PDI), a partir de imagens levantadas por meio de RPA.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a cultura do milho por meio de produtos digitais gerados a partir do processamento de imagens obtidas pela RPA.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Monitorar a cultura do milho por meio do crescimento em estatura do dossel.
- Verificar se transformações espectrais aplicadas as nuvens de pontos podem ser utilizadas como indicadores da dinâmica de evolução do dossel.
- Verificar a correlação entre índices de vegetação e crescimento.
- Elaborar um procedimento baseando-se em técnicas já existentes para acompanhar o crescimento da cultura.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A CULTURA DO MILHO

Temos como características marcantes da planta de milho a forma e a disposição de suas folhas. Estas apresentam-se longas com nervuras paralelas e emergem gradativamente a medida do seu desenvolvimento, marcando-se assim seus estádios vegetativos.

Os estádios referem-se a modificações observáveis na morfologia da planta, principalmente em relação a contagem do número de folhas totalmente desenvolvidas (Fase Vegetativa) e o desenvolvimento total de estruturas destinadas a reprodução (Fase Reprodutiva) (PIONEER, 2021).

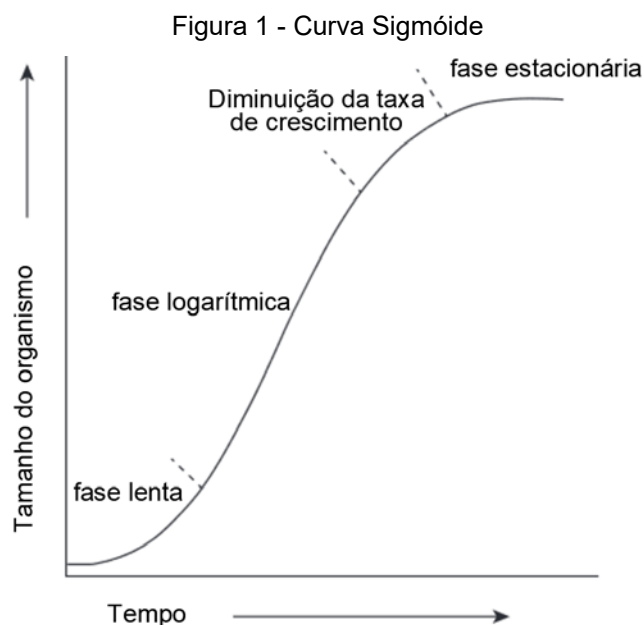
Desta forma, com base no aparecimento das folhas, podemos de forma sucinta descrever o desenvolvimento Vegetativo da planta. Com 4 folhas completamente desenvolvidas, inicia-se o processo de surgimento das inflorescências femininas em interseções existentes no caule a partir das quais surgirão as espigas. Estas têm seu número e tamanho determinados quando se confirma o desenvolvimento total de 12 folhas. As inflorescências masculinas surgem no alto da planta (GALINAT; NAYLOR, 1951).

Segundo Fancelli (2013), com o término da fase vegetativa inicia-se a fase reprodutiva, onde os estádios de desenvolvimento são marcados pela emissão do pendão (VT), florescimento e polinização (R1) e acúmulo de amido no processo de diferenciação dos grãos nas espigas (R2, R3, R4, R5), até atingir o estágio de maturidade fisiológica (R6).

Para que a fenologia do milho se expresse conforme o genótipo da planta, além da presença de radiação solar e da quantidade de água necessária, deve ocorrer o acúmulo de diferentes quantidades de calor em cada fase de desenvolvimento. Entre a emergência e a floração a temperatura ideal para que ocorra o acúmulo desta energia varia entre 24 ° e 30° C (EMBRAPA, 2010).

De acordo com Favarato *et al.* (2015 *apud* SILVA *et al.*, 2006), baseando-se nas condições climáticas e na genética da planta de milho, o ganho de estatura expressa seu desenvolvimento, além de apresentar correlação positiva com a produtividade.

Da mesma forma que outras espécies de organismos, representa-se o crescimento do milho por meio da curva sigmoide, também denominada curva de Gompertz. A Figura 1, demonstra as fases da referida curva conforme Kochhar e Gujral (2020).



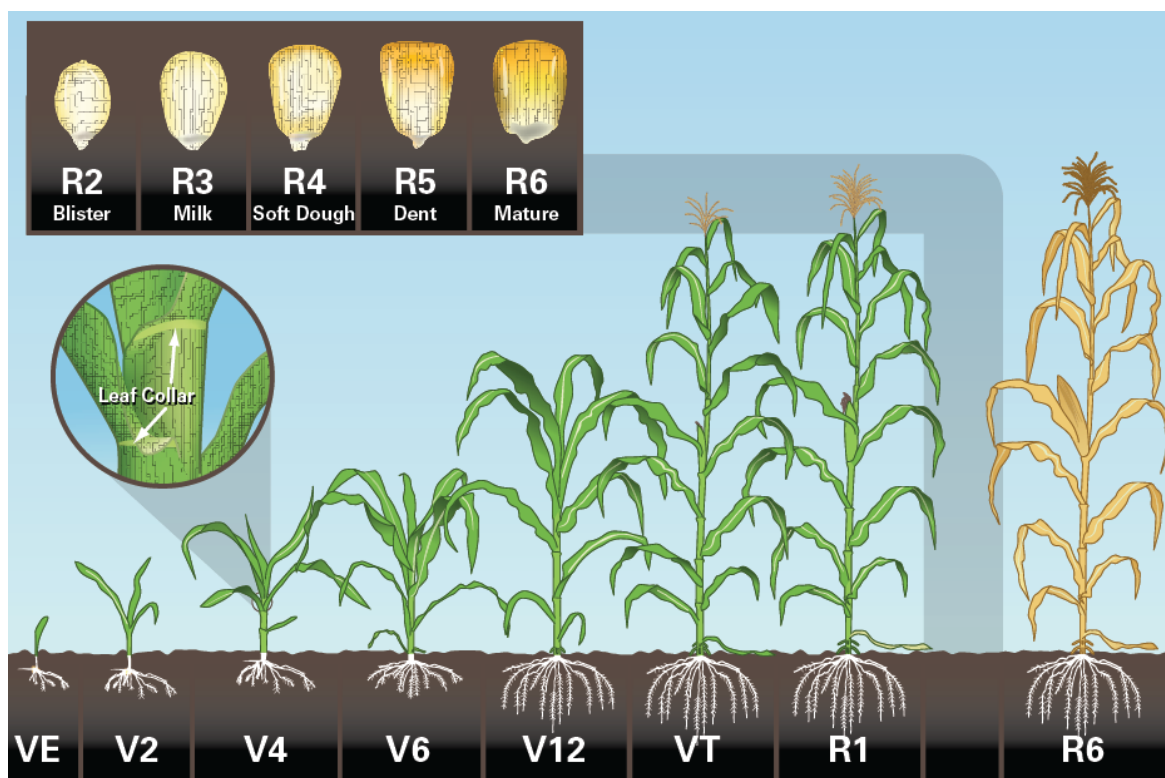
Fonte: Adaptado de Kochhar e Gujral (2020).

Conforme os autores supracitados, a fase lenta caracteriza-se por apresentar taxa de crescimento morosa e estende-se entre 15 a 20 dias, em função da quantidade de nutrientes da semente. A fase logarítmica é proporcional ao tempo e é marcada pelo aumento rápido de estatura e por altas taxas metabólicas. Segue-se um período de diminuição da taxa de crescimento até a espécie atingir a fase estacionária onde não há mais aumento de estatura.

A verificação do crescimento e do desenvolvimento do milho por meio de seu ciclo fenológico é importante para intervenções na cultura. Para Weismann (2008) o estágio V6 a V8 é importante para a administração de suplementos pois é quando ocorre a maior demanda por nitrogênio. Em sistemas de cultivo convencional, recomenda-se a aplicação deste elemento quando as plantas se encontram entre os estádios V4 e V6 ou com 40 a 60 cm de altura (CQFS RS/SC, 2004).

Alguns defensivos agrícolas devem ser aplicados quando a lavoura apresenta uma determinada altura e em períodos de desenvolvimento específicos do milho (HAGER, 2018) e a transição entre a maturidade fisiológica R4-R5 marca o momento ideal de colheita para silagem (FANCELLI, 2013). Apresenta-se por meio da Figura 2 o ciclo fenológico do milho.

Figura 2 - Desenvolvimento fenológico do milho



Fonte: Reitsma, Clay, Hall (2009)

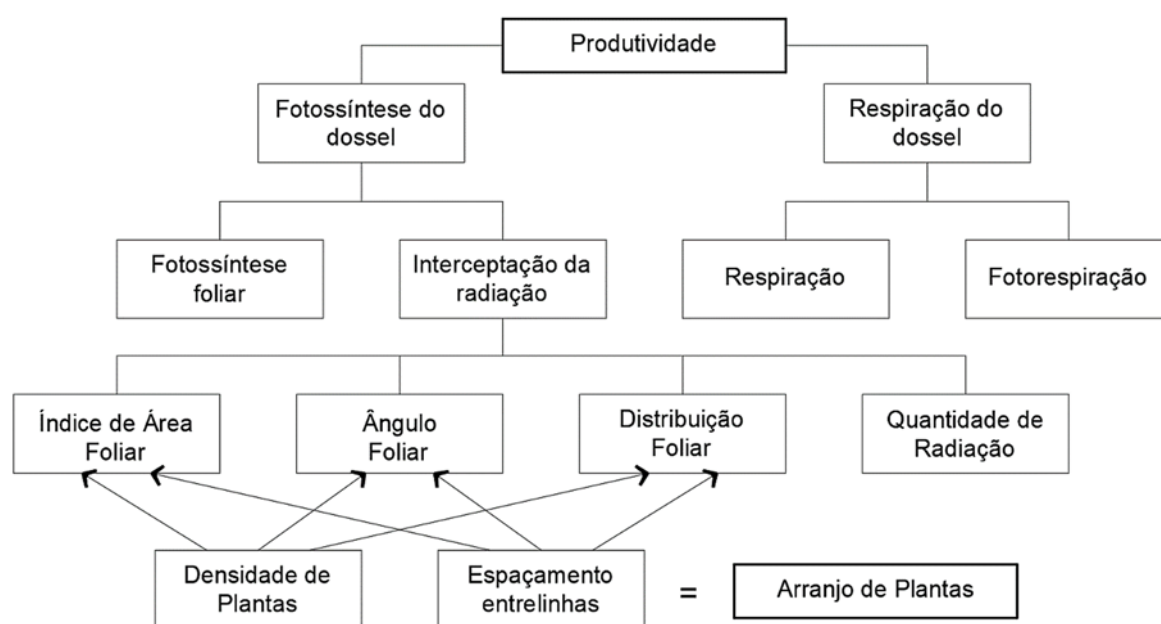
Para Silva *et al.* (2006), um tipo de manejo importante para definição do rendimento em uma cultura é o arranjo de plantas. Este pode ser manipulado na cultura do milho por meio das formas: densidade do estande, espaçamento entrelinhas, uniformidade de emergência e distribuição espacial na linha.

O arranjo de plantas em princípio é determinado pela variedade do milho. Cita-se como exemplo a cultivar AG 9025 para a qual recomenda-se uma densidade entre 65.000 e 75.000 plantas/ha, para uma distância entre linhas de 0,5 a 0,8 metros. No entanto, a recomendação da população de plantas deve ser ajustada considerando-se a fertilidade do solo, risco de estresse climático, época de plantio e o manejo da área (AGROCERES, 2020).

Conforme Fancelli (2013), na ausência de restrições de fatores de produção, a produtividade é função do aumento do número de plantas (entre 70.000 e 85.000 plantas/ha), que por sua vez depende principalmente do genótipo. Porém, havendo-se limitação destes fatores, o ganho de produtividade dependerá da distribuição espacial (dependente do processo de semeadura).

O incremento da densidade de plantas é a forma de manipulação do arranjo que mais afeta o rendimento de grãos de milho, pois mesmo pequenas alterações na população implicam em relativo aumento de produtividade. Esta constatação deve-se ao fato de que o milho não possui mecanismo de compensação de espaços tão eficiente quanto outras espécies que perfilham, limitada capacidade de expansão foliar, baixa prolificidade e estrutura floral monoica (ARGENTA *et al*, 2001). Por meio da Figura 3 verifica-se os vários fatores que afetam o rendimento de grãos em uma cultura.

Figura 3 - Fatores que influenciam na produtividade



Fonte: Gardner *et al.* (1985) e adaptado por Silva *et al.* (2006)

Nota: Demonstra-se pela Figura 3 as interações entre diferentes fatores que determinam o desempenho final de uma lavoura. Todos os fatores (com exceção da quantidade de radiação solar) são afetados pela densidade de plantas e espaçamento entrelinhas que determina o arranjo do estande. A distribuição espacial mais favorável das plantas por área reduzirá a competição intraespecífica otimizando-se o uso de recursos. A aproximação das linhas estimula a taxa de crescimento no início de ciclo incrementando-se a interceptação de luz e aumentando a eficiência de utilização.

Com a diminuição das entrelinhas limita-se o desenvolvimento de plantas daninhas devido a limitação de luz incidente no solo. Ocorre também a proteção do solo dos processos erosivos e da evaporação excessiva de água, havendo maior disponibilidade para a cultura.

Segundo Silva, Kluthcouski e Silveira (2000), uma forma de estabelecer a densidade da lavoura é definindo-se a velocidade de semeadura. Em sua avaliação sobre produtividade e velocidade de plantio, Devem, Madalosso e Brandão (2020), obtiveram uma maior produtividade no plantio direto com a velocidade de 4 km/h. Os

autores atribuem a maior produtividade ao utilizar-se a menor velocidade devido a distribuição espacial mais adequada das sementes durante a semeadura do milho.

2.2 IMAGENS DIGITAIS

As imagens digitais são representações discretas do mundo real. Estas são obtidas por um sensor remoto que registra parte da energia eletromagnética refletida ou emitida pelos objetos, após a interação com a atmosfera e a matéria.

Gonzalez e Woods (2009), definem a imagem digital como uma função bidimensional $f(x,y)$, onde x e y são coordenadas espaciais planas e f é a intensidade de brilho em um ponto.

Normalmente estes sensores são passivos e a intensidade resulta da energia captada que, depois de convertida em sinais elétricos, é armazenada em uma faixa de valores digitais.

Os sensores mais comuns para obtenção de imagens são os baseados em estrutura de Metal-óxido Semicondutor Complementar (tradução para *Complementary Metal Oxide Semiconductor* - CMOS) ou Dispositivo de Carga Acoplada (tradução para *Charge-Coupled Device* - CCD), onde a superfície de cristal a base de silício absorve os fótons de luz e produz cargas elétricas. A carga é proporcional a quantidade de fótons que atinge a área fotossensível que é convertida pelo semicondutor.

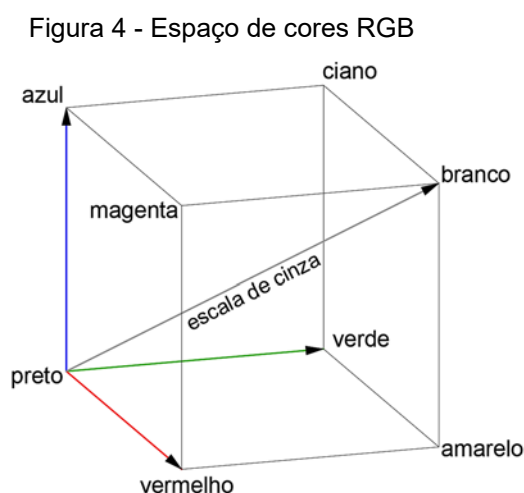
Cada valor digital armazenado corresponde ao menor elemento de uma imagem, denominado pixel. A este refere-se a principal vantagem da utilização dos sensores tipo CMOS que é a maior taxa de leitura de seus valores. Em contrapartida um sensor CCD permite que cada área fotossensível seja maior (MANIN *et al.*, 2019). Outra diferença é apontada por Woods (2012), é que sensores CMOS tendem a apresentar menor qualidade.

A imagem digital é descrita por determinadas características como contraste, brilho e cor. Segundo Saleem *et al.* (2012), define-se contraste como sendo uma medida da variação relativa da luminância, que por sua vez corresponde a quantidade de luz irradiada de acordo com os padrões de sensibilidade espectral da visão humana (CIE, 1986). O contraste também é altamente correlacionado com o gradiente de intensidade.

O brilho relaciona-se à sensação visual de intensidade segundo a qual um estímulo visual de luz parece ser mais ou menos intenso (Wyszecki e Stiles, 2000). Desta forma é de difícil mensuração e deve-se utilizá-lo somente para referências não quantitativas e sensações subjetivas.

A cor é a percepção visual que ocorre quando o espectro visual da luz, entre os comprimentos de onda de 400-700 nm incidem sobre a retina (POYNTON, 1997). A teoria mais aceita para explicar sua percepção é a das três componentes na qual o olho humano dispõe de três tipos de receptores, cada um sensível a um dos canais espectrais do vermelho (*red - R*), verde (*green - G*) e azul (*blue - B*). Como estes atingem ao mesmo tempo os três receptores, os efeitos se integram formando as diferentes sensações de cor.

Conforme Gonzalez e Woods (2009), representa-se o espaço tridimensional de cores RGB por meio de um cubo, apresentado na Figura 4.



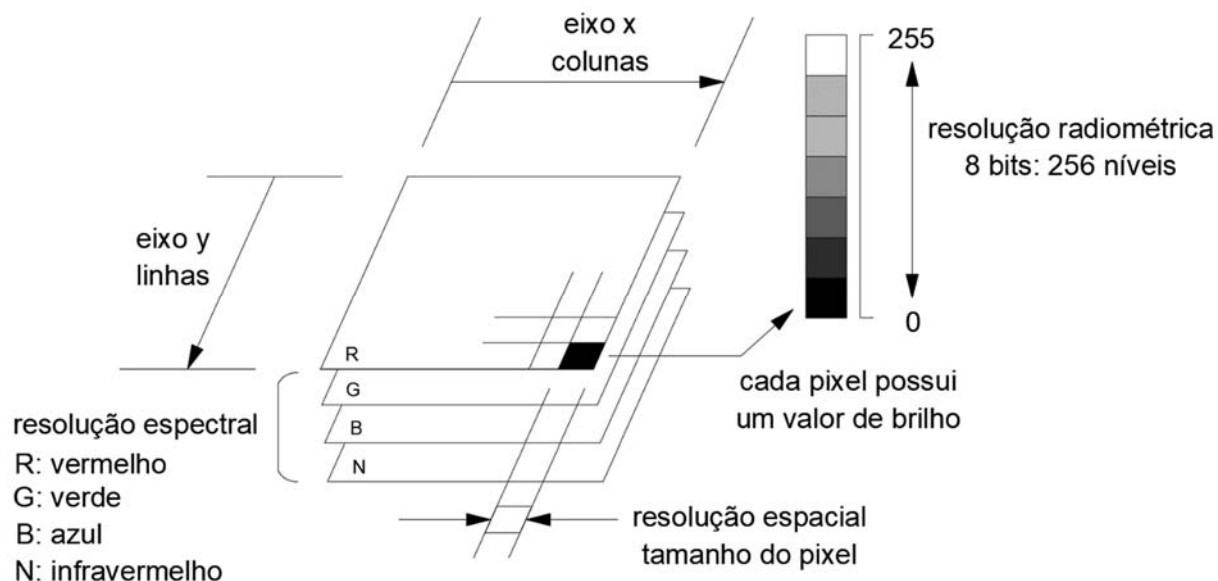
Fonte: O autor.

Nota: Utiliza-se a teoria das três componentes em ambiente computacional como uma forma de sintetizar as cores por meio da mistura de dois ou três comprimentos de onda. Brilho e Luminância aumentam a medida em que a posição de uma cor distancia-se da origem.

A maioria das pesquisas que se utilizam de sensores remotos baseiam-se na relação determinística entre a quantidade de energia captada e as características químicas ou biofísicas de um objeto no terreno (JENSEN, 2014). Assim, cada pixel na imagem deve possuir uma coordenada geográfica específica para localização e um tamanho adequado, estabelecendo-se a resolução espacial.

As imagens obtidas por imageamento terrestre, orbital ou suborbital são descritas por suas resoluções. Exemplifica-se esquematicamente por meio da Figura 5, as resoluções de uma imagem multiespectral de 8 bits.

Figura 5 - Resoluções de uma imagem multiespectral digital de 8 bits



Fonte: Adaptado de Richards e Jia (2006).

Nota: As resoluções variam conforme a arquitetura do sensor e a altura da plataforma.

A resolução espacial está associada ao tamanho do pixel e relaciona-se com a capacidade que o sensor possui em detectar ou identificar objetos na imagem. As resoluções espectral e radiométrica referem-se respectivamente ao intervalo do comprimento de onda que pode ser registrado e a quantidade de níveis digitais possíveis na matriz de dados resultante. A resolução temporal é a frequência com a qual um sistema de sensoriamento remoto registra imagens de uma mesma área, obtendo-se assim registros múltiplos de uma mesma feição ao longo do tempo (JENSEN, 2014).

2.2.1 Armazenamento de imagens

Conforme Schowengerdt (2007), as imagens obtidas por sensores remotos podem ser gravadas utilizando-se de 3 tipos de armazenamento: Banda Intervalada por Pixel (tradução para *Band Interleaved by Pixel* - BIP), Banda em Sequência (tradução para *Band SeQuential* - BSQ) ou Banda intervalada por Linha (tradução para *Band Interleaved by Lines* - BIL).

Os diferentes tipos de armazenamento apresentam vantagens em sua utilização, dependendo do tipo de processamento ao qual a imagem será submetida. Utilizar-se de uma imagem tipo BSQ ou BIP permite respectivamente um acesso mais rápido a dados espaciais e espectrais. O tipo BIL, apresenta velocidade de acesso a

dados mediana em relação as outras duas formas de armazenamento (SCHOWENGERDT, 2007).

Segundo Gonzalez e Woods (2009), as imagens são armazenadas usando-se ou não um determinado método de compressão de dados. Quando o sistema de imageamento não se utiliza de compressão para gravação do arquivo, significa que este foi registrado e em sua forma numérica original, conforme captado pelo sensor CMOS ou CCD. Tem-se assim um arquivo Raw.

Devido ao fato de que se geram arquivos Raw com algoritmos e extensões diferentes dependendo do sensor, pode haver incompatibilidade ao utilizar-se um determinado *software* para processamento ou leitura da imagem. Desta forma tem-se como opção o uso do formato público de arquivo Raw chamado Negativo Digital (tradução para *Digital Negative* - DNG) (ADOBE, 2019).

Um padrão de imagens muito conhecido e utilizado para compressão de imagens em câmeras digitais é o JPEG (*Joint Photographic Expert Group*). Segundo Marques Filho e Vieira Neto (1999), esta família de algoritmos possui modos de operação sem perdas e com perdas de dados.

Na codificação com perdas aplica-se a Transformada Discreta do Cosseno (Tradução para *Discrete Cosine Transform* - DCT) e analisa-se os coeficientes resultantes para escolha dos dados que serão descartados. Este processo baseia-se no princípio de que a visão humana se limita em distinguir entre três a cinco mil cores. Devido a este fato, preservam-se somente informações que o olho humano pode detectar e discriminar, produzindo-se uma imagem com a qualidade visível preservada. No entanto perde-se informação no processo (DJI, 2020).

2.2.2 Transformações espectrais

As técnicas de PDI são utilizadas principalmente para facilitar análises qualitativas promovendo o realce de feições por meio da otimização do brilho e do contraste. Desta forma é possível a obtenção de melhores resultados na determinação de características fenotípicas das plantas de uma cultura. Facilita-se assim o processo de extração de informações, com base em suas respostas espectrais.

Uma maneira de aumentar o contraste é por meio da transformação do histograma. Os valores dos níveis digitais são expandidos para o intervalo total possível, ocorrendo a diferenciação dos níveis de brilho da imagem.

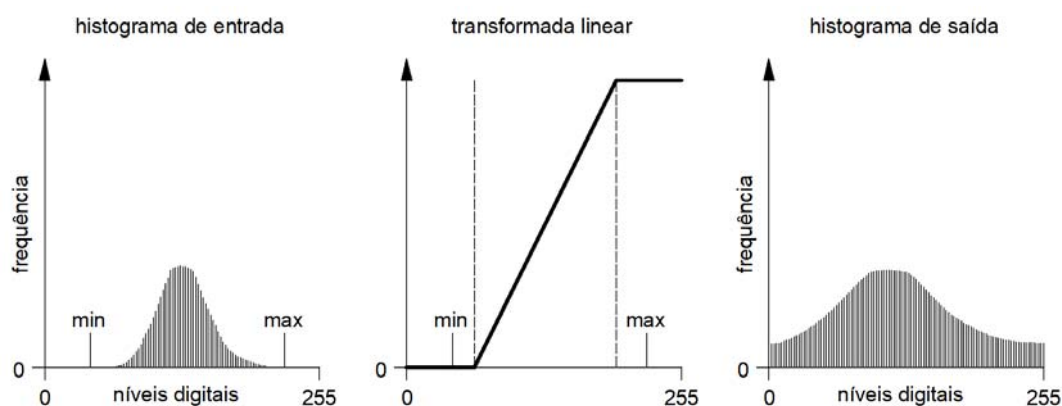
No entanto o aumento da percepção do brilho e do realce não depende somente da definição numérica ou da distribuição dos níveis digitais no histograma. Fatores como a estrutura espacial da imagem (WOODS, 2012), nível de luz do ambiente de visualização e características do monitor de exibição, influenciam na percepção do contraste e descrição da imagem.

As diferentes finalidades de aplicação do contraste, não possuem qualidade padronizada e a escolha do método de expansão do histograma dependem das características da imagem, do objetivo e da capacidade de interpretação do analista.

Por meio da transformação linear, a imagem pode ter seu contraste e brilho aumentados sem distorcer a informação radiométrica da imagem. A transformação linear de contraste é definida pela função onde um coeficiente controla o aumento de contraste e o outro modifica o brilho.

No caso da transformação linear por porcentagem, exclui-se os níveis digitais posicionados nos extremos do histograma a partir de um valor especificado, distribuindo linearmente os valores intermediários no intervalo do eixo x, conforme demonstrado esquematicamente na Figura 6.

Figura 6 - Aplicação da transformação linear em uma imagem 8 bits



Fonte: O autor.

Outra forma de transformação espectral utilizada no processamento de imagens ocorre com a utilização dos índices de vegetação. Segundo Mather (2004), estes índices são operações matemáticas que consideram duas ou mais bandas espectrais simultaneamente para indicar a saúde da vegetação ou produtividade.

Para Ponzoni e Shimabukuro (2007), a proposição de índices para estudar a vegetação baseia-se no comportamento característico das plantas em resposta aos

comprimentos de onda do vermelho visível e do infravermelho próximo. Esta característica espectral peculiar, fundamenta o conhecido Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (tradução para *Normalized Difference Vegetation Index - NDVI*) (ROUSE *et al.*, 1974).

Entretanto, sensores RGB que registram os comprimentos de onda do visível também são indicados para o estudo da vegetação, pois relações entre as respostas que as plantas apresentam entre a alta reflectância no comprimento de onda do canal verde e alta absorção no comprimento de onda do vermelho, podem ser estabelecidas (BENDIG *et al.*, 2015, *apud* GITELSON *et al.*, 2002; GAO, 2006; MOTOHKA, 2010).

Segundo Maes e Steppe (2019), as imagens RGB podem ser utilizadas para gerar índices de vegetação, sendo altamente recomendadas para estudos em agricultura como ataque de patógenos, detecção de ervas daninhas, verificação da fase de crescimento e estimativa de altura e biomassa.

Assim, muitos índices espectrais que se utilizam somente dos comprimentos de onda do visível foram desenvolvidos para estimar parâmetros biofísicos, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Exemplos de índices de vegetação do visível

NGRDI	Índice da Diferença Normalizada do Verde e Vermelho <i>Normalized Green Red Difference Index</i> (TUCKER <i>et al.</i> , 1979)
GLI	Índice Foliar Verde <i>Green Leaf Index</i> (LOUHAICHI <i>et al.</i> , 2001)
VARI	Índice Resistente à Atmosfera no Visível <i>Visible Atmospherically Resistant Index</i> (GITELSON <i>et al.</i> , 2002)
RGBVI	Índice de Vegetação RGB <i>RGB Vegetation Index</i> (BENDIG <i>et al.</i> , 2015)
NGBI	Índice Normalizado do Verde e Azul <i>Normalized Green Blue Index</i> (MICHEZ <i>et al.</i> , 2018)

Fonte: O autor.

No cálculo do índice NGRDI, a diferença entre o canal espectral verde e o vermelho permite a diferenciação entre a superfície do solo e as plantas. A soma normaliza a variação da intensidade da luz entre os valores dos pixels das bandas (HUNT, *et al.*, 2005).

O valor obtido pela aplicação dos índices NGRDI e GLI que se utilizam das bandas do visível é o mesmo quando da aplicação do NDVI e varia entre -1 e 1. Porém, normalmente o intervalo que corresponde as plantas devido a atividade da clorofila encontra-se entre 0,2 e 0,8 (ENVI 5.3, 2015, *apud* ROUSE *et al.*, 1973).

Motohka *et al.*, (2010), avaliaram a utilização o NGRDI como indicador de desenvolvimento fenológico e encontraram em suas análises valores entre - 0,112 e 0,371. Nos experimentos realizados por Shimada *et al.* (2012), o índice supracitado apresenta valores negativos para o solo.

De acordo com Maes e Steppe (2019 *apud* YUE *et al.*, 2017) é possível obter estimativas de biomassa combinando-se a altura estimada por meio da aplicação de um algoritmo *Structure from Motion* (SfM) e um ou mais índices de vegetação.

As técnicas de transformação linear e a aplicação de índices de vegetação não adicionam novos dados a imagem. Nestas transformações ocorre a redistribuição da informação original para uma forma de melhor compreensão e interpretação visual (SCHOWENGERDT, 2007).

2.3 AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA - RPA

As RPAs, popularmente conhecida como Drones ou Veículos Aéreos Não Tripulados (tradução para *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV), são aeronaves não tripuladas, pilotadas a partir de uma estação remota e que tenham qualquer outra finalidade que não seja recreativa, tais como comercial, corporativa e experimental.

Normalmente estes equipamentos diferem quanto ao peso de decolagem, velocidade média e tipo de propulsão. A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2017), divide as RPAs quanto ao peso e suas respectivas exigências conforme a atividade a qual se destinam. O Quadro 2 demonstra esta classificação.

Quadro 2 - Classificação das RPAs e exigências de aeronavegabilidade

	Peso máximo de decolagem	Exigências de aeronavegabilidade
CLASSE 1	Acima de 150 Kg	- Possuir certificado como as aeronaves tripuladas - Possuir identificação e Matrícula da aeronave - Ser registrada no Registro Aeronáutico Brasileiro
CLASSE 2	Acima de 25 kg e abaixo ou igual a 150 kg	- Apresentação de requisitos técnicos do fabricante - Registro Aeronáutico Brasileiro - Identificação e Matrícula da aeronave
CLASSE 3	Abaixo ou igual a 25 kg	<ul style="list-style-type: none"> • BVLOS: Projeto autorizado pela ANAC e registro de marca, nacionalidade e matrícula da RPA • VLOS: Não necessita de projeto e a RPA deve ser homologada pela ANAC

Fonte: O autor.

Nota: BVLOS (*Beyond Visual Line Of Sight*) e VLOS (*Visual Line Of Sight*), referem-se respectivamente a modos de utilização da RPA onde o operador não mantém contato visual direto com o equipamento

e o contato visual direto é possível. Mais informações sobre a regulamentação da utilização da RPA no Brasil podem ser encontradas em ANAC (2017) e DECEA (2019).

Equipamentos da classe 3 são usados frequentemente em trabalhos aerofotogramétricos devido ao menor custo e a facilidade de operação. Os levantamentos das imagens são completamente automatizados por algoritmos. Os aplicativos, além de calcularem o planejamento de voo, assumem o controle da aeronave e dos dispositivos em solo (COLOMINA; MOLINA, 2014). O equipamento precisa de assistência para decolagem e pouso, mas após iniciar-se o voo, cabe ao operador em solo apenas supervisionar o levantamento (NIAG, 2004).

A conexão entre o controle e a RPA ocorre via ondas de rádio e a navegação por meio de Sistemas Globais de Navegação por Satélite (tradução para *Global Navigation Satellite System* - GNSS). Os dados provenientes do GNSS e de outros sensores como barômetro, acelerômetro e giroscópio que integram a Unidade de Medida Inercial (tradução para *Inertial Measurement Unit* - IMU) são integrados via processo de fusão implementado por um Filtro de Kalman. Desta forma determina-se a posição, velocidade, tempo de deslocamento e atitude da RPA durante o voo. Por meio da Figura 7, demonstra-se dois modelos de RPA de pequeno porte.

Figura 7 - Modelos RPA classe 3 de pequeno porte



A



B

Fonte: DJI; SenseFly (2020).

Nota: A Figura 4A apresenta a RPA modelo rotor quadricóptero Mavic 2 Pro de 1,05 kg (DJI Technology Co Ltda) e a Figura 4B o modelo asa fixa eBee Clássico de 0,69 kg (senseFly SA). Modelos rotor podem ser classificados quanto ao número de rotores e apresentam como vantagens menor custo e maior versatilidade pois decolam e pousam na vertical. As RPAs asa fixa apresentam maior velocidade, autonomia de voo e eficiência no consumo de energia.

Segundo Gonzalez, Mcfadyen e Puig (2018), 72,2% das RPAs utilizadas em aplicações agrícolas são modelos rotores e 28,3% são modelos asa fixa. O mercado mundial de RPAs é disputado por várias empresas onde, as que apresentam maior representatividade, são a Parrot SA e a DJI (Drone II, 2016). Atualmente 70% das RPAs comerciais são vendidas pela DJI (TECHNODE, 2018).

Muitos tipos de sensores podem ser embarcados nas RPAs para tomada de fotos e posterior processamento fotogramétrico. A limitação de uso normalmente refere-se à possibilidade de inserção de uma estrutura adaptada para acoplar o sensor e a capacidade de carga útil da aeronave. Cita-se como exemplos para o modelo rotor demonstrado na Figura 4A, as câmaras DJI M2E e Hasselblad L1D-20c e para o modelo demonstrado na Figura 4B, as câmaras adaptadas para RPA asa fixa Canon S110 NIR e Sony DSC-WX220.

Assim a qualidade das imagens registradas dependerá das limitações da RPA, das condições climáticas na data de voo e das características da câmera utilizada.

2.3.1 Uso da RPA para levantamentos aerofotogramétricos

A utilização da RPA como plataforma para sensoriamento remoto apresenta vantagens em detrimento de outras técnicas. Cita-se como benefícios a possibilidade de obtenção de imagens mesmo em dias nublados, o preço reduzido em relação às aeronaves pilotadas e a redução no tempo de preparo para o início do voo (TORRES *et al.*, 2014)

Em determinados estudos, a resolução espacial é um fator limitante para bons resultados devido a necessidade de identificar detalhes sobre o objeto de pesquisa. Viabiliza-se por meio da RPA, levantamentos em menores alturas, proporcionando que o imageamento resulte em ortomosaicos de maior resolução espacial. Desta forma, possibilita-se a utilização desta técnica para mapeamento em grande escala (maior que 1:1000) no suporte à decisão para monitoramento das culturas, tornando possível a identificação das estruturas das plantas que constituem o dossel (ZHU *et al.*, 2019a).

Os autores supracitados, demonstraram que menores resoluções espaciais limitam a capacidade de monitoramento das culturas. Devido a maior Distância Amostral em Solo (tradução para *Ground Sample Distance* - GSD) que as imagens obtidas por RPA apresentam, estas são mais adequadas para estudos de

características fenotípicas, em detrimento das imagens geradas por meio de sensores orbitais. Experimentos realizados por Tattaris, Reynolds e Chapman (2016) com imagens RPA e imagens de satélites fusionadas com resolução espacial de 0,46 m, demonstraram esta limitação.

Segundo Lelong, et. al. (2008) a baixa altura de aquisição das fotos confere aos dados maior homogeneidade radiométrica em detrimento da obtenção de imagens com aeronaves tripuladas ou satélites.

Para Sieberth, Wackrow e Chandler (2015), o principal problema do levantamento utilizando-se da RPA, refere-se à posição instável que a aeronave e a câmera podem apresentar no momento da tomada da foto. Esta instabilidade da câmera pode causar a degradação da imagem e conseqüentemente erros no processamento de grandes conjuntos de dados.

Uma segunda desvantagem da utilização da RPA relaciona-se a sua autonomia de voo, determinada pela capacidade de carga suportada pela bateria. Dependendo do tamanho da área de estudo, a aeronave retornará n vezes até o ponto de origem, para que a bateria seja substituída e o levantamento possa prosseguir.

2.3.2 Processamento Fotogramétrico

De acordo com a Sociedade Americana de Fotogrametria (*American Society Of Photogrammetry - ASP*) (1966), pode-se definir a fotogrametria como arte, ciência e tecnologia para obter-se medidas, interpretações e informações sobre objetos ou meio ambiente, a partir do uso de processos que registrem padrões de energia eletromagnética em fotografias. A Aerofotogrametria refere-se a fotogrametria com o objetivo de restituição de fotos aéreas e aferição de medidas no terreno.

O processamento das fotos tomadas pela RPA, tem sua relação com o processamento de imagens aéreas provenientes de outras aeronaves, quando o objetivo é a elaboração de modelos para restituição e produção de ortofotos.

Conforme Andrade (1998), a perfilação do alinhamento de voo em ambiente computacional, permite a geração dos dados necessários para os Modelos Digitais de Elevação (MDE) e conseqüentemente da restituição do terreno fotografado. Esta técnica denomina-se Fototriangulação.

Para realizar-se a fototriangulação das imagens obtidas pela RPA, usa-se o algoritmo SfM-MVS (*Structure from Motion - Multi-View Stereo*). Estes detectam

pontos homólogos nas imagens e triangulam suas posições (Szeliski, 2010). Desta forma tem-se a nuvem esparsa.

O SfM tem por objetivo encontrar o conjunto de pontos entre diferentes imagens correspondentes, o que é necessário para estimar a posição da câmera no instante de tomada da fotografia (SZELISKI, 2010). É composto pelas etapas de identificação de pontos em comum nas imagens, cálculo das posições tridimensionais de pontos correspondentes (*keypoints*) e geração da nuvem esparsa (ISELI; LUCIEER, 2019).

Conforme Szeliski (2010), a técnica para estimar os parâmetros de orientação interior denomina-se autocalibração e converte uma reconstrução projetiva em métrica que equivale as matrizes de calibração desconhecidas e associadas a cada imagem.

Ocorre a orientação indireta do sensor onde a calibração é derivada de medidas entre as diferentes imagens de um objeto (COLOMINA; MOLINA, 2014). Estes cálculos baseiam-se no princípio da paralaxe, aplicada nas imagens verticais.

Segundo Colomina e Molina (2014), apud Cramer (2013), a autocalibração produz resultados semelhantes a pré-calibração e uma combinação das duas técnicas não apresenta melhora significativa nos resultados.

Desta forma, aplica-se o algoritmo SfM para o alinhamento das imagens de voo. No programa *Agisoft Metashape*, este procedimento permite a seleção de diferentes níveis de processamento que estão relacionados ao nível de detalhe e acuracidade da nuvem esparsa resultante. Esta pode ser processada em seu tamanho original denominado *Ultra High Quality* (Ultra alta qualidade) ou em níveis decrescentes de tamanho da imagem pelo fator 4 (Agisoft, 2017).

Utiliza-se o algoritmo *Multi-View Stereo* (MVS) para a geração do mapa de profundidade e o adensamento da nuvem. O cálculo para computar a densificação de pontos é realizado por estéreo correspondência, que pode ser implementada conforme proposto por Scharsteine e Szeliski (2002) ou triangulação 3D (SZELISKI, 2010).

Entretanto o algoritmo SfM-MVS apresenta questões que causam diminuição da acurácia da modelagem geométrica (TRIGGS *et al.*, 2000). A imperfeição da reconstrução de geometria é um dos problemas da visão computacional porque o processo de correspondência automática entre pontos homólogos, gera inconsistências que degradam a solução (OLSSON; ERIKSSON; HARTLEY, 2010).

Geram-se falsas correspondências no processamento de múltiplas visualizações (BERGER *et al.*, 2014). Desta forma, o cálculo da nuvem densa de pontos a partir do processamento de imagens por algoritmos MVS contém necessariamente ruídos e valores discrepantes (LIU; TANG; SHEN, 2020).

Devido a estas questões inerentes ao processamento dos dados, Jensen e Mathews (2016), apud Dandois e Ellis (2013), apontam que a necessidade de remoção de dados em produtos de algoritmos SfM é comum.

A nuvem de pontos é pré-requisito para geração do MDE. Este é definido como sendo a matriz ordenada de números que representam a distribuição espacial das elevações acima de algum dado arbitrário na paisagem (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991). O Modelo Digital de Terreno (MDT), refere-se a matriz ordenada de elevação 3D em relação ao terreno.

Para o cálculo do MDE, utilizam-se técnicas de interpolação para gerar dados pontuais partindo-se de pontos conhecidos. Dentre as técnicas existentes, a Ponderação do Inverso da Distância (tradução para *Inverse Distance Weighted* - IDW) apresenta bons resultados quando aplicada a nuvens de pontos (AKGUL *et al.*, 2018).

A navegação e o posicionamento da RPA durante o voo são determinados por sistemas GNSS que também coletam as coordenadas que serão salvas juntamente com a imagem, no momento da tomada da foto. O processamento das imagens utilizando-se somente dos dados posicionais absolutos provenientes do sistema de navegação da RPA, oferece baixa acurácia ao trabalho e denomina-se semicontrolado (SILVA; RIBEIRO, 2020).

Objetivando-se conferir qualidade posicional e geométrica do processamento de dados da RPA, Pontos de Controle em Solo (tradução para *Ground Control Points* - GCPs) devem ser levantados com a utilização de receptores geodésicos. Caso estes não sejam obtidos a partir da tecnologia de Posicionamento Cinemático em Tempo Real (tradução para *Real Time Kinematic* - RTK), deverão ser pós-processados conforme o método utilizado, para que apresentem a acurácia em relação a superfície da Terra.

Assim as coordenadas corrigidas são utilizadas no alinhamento das imagens de voo via programa aerofotogramétrico. A acurácia em produtos fotogramétricos também depende da distribuição adequada dos pontos de controle (ABLANEDO *et al.*, 2018) e de sua quantidade ideal (ONIGA; BREABAN; STATESCU, 2018). Em experimentos utilizando-se de diferentes quantidades de pontos de controle precisos,

no processamento de dados RPA, Rosa (2018) obteve modelos MDT com menor e maior precisão.

2.3.3 Restituição e obtenção de ortomosaicos

Segundo Andrade (1998), restituição refere-se ao processo de reconstrução do terreno fotografado por meio de suas fotografias.

Desta forma, partindo-se de uma nuvem de pontos obtida pelo processamento das fotos, gera-se o MDE necessário para criar uma grade regular retangular ou triangular do terreno e assim realizar a ortorretificação das fotos conforme uma data de levantamento aerofotogramétrico.

Com este objetivo, pode ser utilizado um interpolador como o *IDW* conforme implementação desenvolvida pela Agisoft (CINAT *et al.*, 2019). Este interpolador baseia-se no pressuposto de que quanto mais próximo um ponto estiver de outro, maior será a correlação entre eles (MITAS; MITASOVA, 1999). Assim, o peso para criação de um ponto é diretamente proporcional a sua proximidade com cada ponto existente.

Outra forma de criar um MDE é utilizar-se de um algoritmo para geração de uma Rede Irregular de Triângulos adjacentes e não sobrepostos (tradução para *Triangulated Irregular Network - TIN*) (CHEN; GUEVARA *et al.*, 1987).

A estrutura TIN é do tipo vetorial e pode ser elaborada aplicando-se a Triangulação de *Delaunay* na qual os vértices dos triângulos gerados, derivam diretamente de pontos originais, não havendo alteração de dados para suavização da superfície (GONÇALVES, 2006). Segundo Câmara (2005) uma maior quantidade de faces triangulares equiláteras, aumenta a exatidão com que se descreve a superfície, na qual qualquer ponto de elevação pode ser estimado.

O processo fotogramétrico padrão utilizado para relacionar o espaço de projeções bidimensionais em tridimensionais utiliza-se da Equação da Colinearidade (JAGT *et al.*, 2015). Por meio desta implementa-se a ortorretificação que tem por objetivo eliminar os efeitos da projeção perspectiva inerente ao processo de aquisição das fotos, obtendo-se a projeção ortogonal.

O procedimento ocorre por meio da aplicação das equações (01) e (02) (Andrade, 1998), que calculam as coordenadas XY do espaço imagem a partir das coordenadas XYZ do MDE que representa o espaço objeto:

$$x - x_0 - \Delta = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$y - y_0 - \Delta = -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

Onde:

$\begin{cases} x - x_0 \\ y - y_0 \end{cases}$	coordenadas x', y' na ortofoto
x_0, y_0	coordenadas do ponto principal
c	distância focal da câmara
m_{ij}	elementos das 3 matrizes de rotação χ, φ, ω
X, Y, Z	coordenadas de pontos no espaço objeto do sistema fotogramétrico
X_0, Y_0, Z_0	coordenadas dos centros de perspectiva da câmara no momento da tomada da foto
$\Delta x, \Delta y$	referem-se respectivamente aos parâmetros matemáticos para modelagem de distorções das lentes das câmaras $x' = -c \frac{X'}{Z'}$ e $y' = -c \frac{Y'}{Z'}$

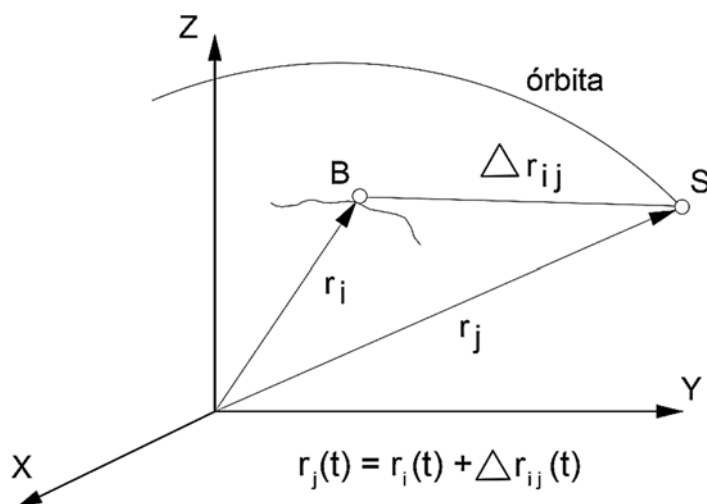
Na etapa final do processamento realiza-se a junção das ortofotos em uma única imagem, criando-se desta forma um ortomosaico.

2.4 SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE

Utiliza-se o termo GNSS para designar diferentes sistemas de posicionamento como o Sistema de Posicionamento Global (tradução para *Global Positioning System* - GPS) de origem norte-americana e o Sistema Global de Navegação por Satélite (tradução para *Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema* - GLONASS) criado pela União Soviética, e atualmente mantido pela Rússia.

Segundo Monico (2008), o princípio de funcionamento dos sistemas GNSS baseia-se na medida das distâncias entre o transmissor e o receptor partindo-se de ondas de rádio. Medindo-se as distâncias e conhecendo-se o posicionamento absoluto dos satélites, determina-se a posição do receptor GNSS pelo processo de triangulação. Calcula-se as distâncias a partir da velocidade de propagação das ondas e do tempo necessário para que os sinais emitidos pelos satélites alcancem o receptor. Na Figura 8, demonstra-se o princípio fundamental de um sistema GNSS.

Figura 8 - Relação básica da geodésia por satélite



Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

Nota: A posição do satélite (S) no instante (t) deve ser conhecida; A pseudodistância entre satélite e receptor é determinada durante o rastreamento; A posição do ponto (B) é determinada ao rastrear no mínimo 4 satélites simultaneamente. A quarta observação corrige o erro de falta de sincronização entre o relógio dos receptores e os relógios dos satélites.

Conforme Seeber (2003), define-se uma relação entre as observações, caracterizadas pelo vetor Δr_{ij} e os parâmetros r_j (que descrevem a posição do satélite) e r_i (localização da estação de observação), no instante (t). Todos os parâmetros podem ser considerados como desconhecidos ou alguns como conhecidos para estimativa, simplificando-se e estabilizando-se a solução.

Segundo a Agência Europeia de Sistemas GNSS (tradução para *European Global Navigation Satellite Systems Agency - EGSA*) (2020), a eficiência do sistema depende de determinados critérios como: Acurácia (diferença entre a posição, velocidade ou tempo medido por um receptor e os dados reais); Integridade (capacidade de um sistema fornecer um limite de confiança e, no caso de uma anomalia nos dados, emitir um alerta); Continuidade (capacidade do sistema funcionar sem interrupção); Disponibilidade (porcentagem de tempo em que um sinal atende aos outros critérios descritos).

Os satélites da constelação GPS e GLONAS transmitem de forma contínua por meio das frequências portadoras L1 e L2. A banda L1 transmite os Códigos de Aquisição Livre (tradução para *Coarse/Acquisition - C/A*, que possuem informações como contagem do relógio e posição do satélite) e o Código de Precisão (tradução para *Precise Code - P*, que possui informações sobre a precisão dos dados). A banda L2 transmite somente o Código de Precisão. É necessário que os códigos recebidos de ambas as portadoras sejam processados para obter-se a acurácia posicional do

levantamento. Apresenta-se no do Quadro 3, um comparativo entre os sistemas GPS e GLONASS.

Quadro 3 - Comparação entre os sistemas GPS e GLONASS

	GLONASS	GPS
Satélites operacionais	24	31
Número de Planos Orbitais	3	6
Inclinação da Órbita	64,8	55
Altitude da Órbita	19.100 Km	20.200 Km
Período de Revolução	11h15m40s	11h50m00s
Datum	Parametry Zemli 1990.11	World Geodetic System 1984
Elipsóide	PZ-90	WGS84
Sistema de Tempo	TUC (SU)	TUC (USNO)
Frequência das Portadoras	L1:1602+0,5625 * n (MHz) L2: 1246 +0,4375 * n (MHz) n é igual ao número de satélites	L1:1575,42 MHz L2: 1227,60 MHz
Frequência de Código	C/A: 0,511 Mhz P: 5,11 Mhz	C/A: 1,023 Mhz P: 10,23 Mhz
Técnica de Separação do Sinal	FDMA CDMA	CDMA

Fonte: Monico (2008); IAC (2020).

Nota: Satélites da constelação GPS do bloco IIR e IIF disponibilizam também a onda portadora L5 (1176,45 MHz) e satélites da constelação GLONASS das séries M e K a onda portadora L3 (1201,50 MHz). Mais informações sobre os sistemas GPS e GLONASS podem ser encontradas em Monico (2008) e IAC (2020).

2.4.1 Métodos de Levantamento GNSS

As precisões das coordenadas levantadas ao utilizar-se de um sistema GNSS, dependem em grande parte da técnica usada para coleta dos dados provenientes das portadoras da banda L. Conforme Monico (2008), o método de posicionamento pode ser classificado em: Absoluto, Relativo e Diferencial.

No posicionamento Absoluto apenas um receptor é utilizado visando a determinação das coordenadas de um ponto referidas ao *Datum* do sistema ou sistemas GNSS em uso. No caso do GPS adota-se o WGS84 e para o GLONASS o PZ-90. Este é o tipo de levantamento usado em receptores de navegação que se utilizam para o cálculo da posição somente a pseudodistância derivada do código C/A e a mensagem de navegação (NAKAO; KRUEGER, 2017).

O método absoluto também está presente em receptores de uma ou duas frequências em que os códigos e fases das ondas portadoras são armazenados no

equipamento para posterior pós-processamento em serviços online que aplicam as correções para os relógios dos satélites e as efemérides precisas aos pontos enviados. Desta forma, as coordenadas passam a apresentar precisão centimétrica (IBGE, 2017).

Para realizar-se o levantamento relativo, o usuário necessita de pelo menos dois receptores GNSS que irão rastrear pelo menos quatro satélites em comum. Um equipamento irá ocupar a base e o outro o ponto a ser levantado. As coordenadas com precisão, serão obtidas posteriormente após o processamento dos dados armazenados nos receptores em *softwares* específicos.

As precisões que podem chegar ao milímetro, dependem de fatores como: receptor utilizado, número de satélites observados, obstruções a chegada do sinal, comprimento da linha de base, tempo de rastreamento e valor da diluição da precisão (IBGE, 2008).

O posicionamento diferencial, baseia-se na transmissão de dados de correções diferenciais realizadas na estação de referência (receptor base com coordenadas conhecidas) para o receptor *Rover*, que recebe as correções durante o rastreamento, verificando-se de imediato a coordenada precisa do ponto a ser levantado.

Segundo Nakao e Krueger (2017) quando as posições instantâneas derivam das correções diferenciais processadas utilizando-se das observações da fase do código e do código suavizado pela fase da onda portadora, o método denomina-se GPS Diferencial (*Differential GPS - DGPS*) e quando se usa a fase da onda portadora de RTK.

2.4.2 Validação de Produtos cartográficos

A validação de produtos cartográficos normalmente é realizada a partir de coordenadas conhecidas levantadas por meio de equipamentos GNSS e de seus respectivos pontos homólogos obtidos em meio digital. A partir destas informações, pode-se averiguar a acurácia posicional, utilizando-se por exemplo do cálculo da raiz do erro médio quadrático (tradução para *Root Mean Square Error - RMSE*)

Segundo Ghilani (2017), o cálculo do RMSE para avaliar a qualidade de um trabalho de mapeamento está em conformidade com as normas da Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (tradução para *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS*).

Conforme as normas nacionais, determina-se a acurácia posicional absoluta planialtimétrica de um produto cartográfico, por meio do cálculo dos valores de Erro Médio Quadrático horizontal (RMSE_x) e Erro Médio Quadrático vertical (RMSE_y) e do posterior enquadramento dos resultados em função do Erro Máximo (EM) e do Erro Padrão (EP) (DSG,2016).

Apresenta-se os valores de referência EP para determinação do Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) planimétrico e altimétrico, respectivamente por meio dos Quadros 4 e 5, elaborados pela Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) (2016) de acordo com o procedimento de cálculo previsto no decreto 89.817/84.

Quadro 4: PEC-PCD Planimétrico

PEC (1)	PEC - PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
	A (2)	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25
A	B (1)	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50
B	C (1)	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50
C	D (1)	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00

Fonte: Adaptado de DSG, 2016.

Quadro 5: PEC-PCD Altimétrico

PEC – PCD (3)	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00

Fonte: Adaptado de DSG, 2016.

Segundo BRASIL (1984), além da verificação por meio do valor do EP, um produto cartográfico será enquadrado em uma determinada classe e escala quando 90% dos pontos testados apresentarem valores das discrepâncias iguais ou inferiores a um determinado valor PEC de referência.

2.5 TRABALHOS CORRELATOS

A pesquisa por trabalhos correlatos buscou apresentar autores que demonstraram a RPA como uma plataforma confiável e eficiente para levantamento de dados sobre o estado das culturas. Outra questão importante, refere-se a apresentação da tecnologia RPA especificamente aplicada na obtenção de imagens da cultura do milho, tema desta dissertação.

Segundo Luo *et al.* (2016), parâmetros biofísicos referem-se as variáveis utilizadas para verificação do desenvolvimento das culturas e saúde das plantas, tais como altura, Índice de Área Foliar (IAF) e estimativa de biomassa.

Para Jensen (2014), dados obtidos a partir de sensores remotos podem fornecer diretamente informações sobre variáveis biofísicas como estrutura e altura do dossel, biomassa, índice de área foliar, teor de clorofila, dentre outras. Nessa perspectiva, os sensores remotos demonstram informações de forma semelhante aos levantamentos realizados em solo, porém, não apenas pontualmente, mas em grandes áreas geográficas.

Os dados podem ser destinados a outras investigações científicas e podem ser básicos ou híbridos, quando criados a partir da análise sistemática de mais de uma variável biofísica. Cita-se o exemplo da modelagem de dados como reflectância espectral, temperatura, umidade, altura e cor e/ou tonalidade, com o objetivo de detectar estresse na vegetação (JENSEN, 2014).

Os sensores em RPA são utilizados para análises de diversas culturas como no caso do sorgo (SHAFIAN *et al.*, 2018), trigo (MADEC *et al.*, 2017), tomate (ENCISO *et al.*, 2019) e soja (TETILA *et al.*, 2017).

Na cultura da soja, Tetila *et al.* (2017), avaliaram estatisticamente o potencial de reconhecimento de doenças nas folhas, atingindo a precisão de 98% em experimentos que se utilizaram de imagens levantadas nas alturas de 1 e 2 m.

De acordo com Enciso *et al.* (2019), é possível avaliar a altura na lavoura do tomate utilizando-se de dados obtidos por meio de sensores embarcados na RPA. Constatou-se também alta correlação entre a cobertura do dossel estimada a partir dos dados levantados e IAF medido em solo.

Os trabalhos de Tetila *et al.* (2017) e Enciso *et al.* (2019), são relevantes porque validam dados provenientes da RPA para o estudo das plantas. O valor do pixel e a

altura estimada são as premissas para geração de nuvens de pontos, MDEs e ortomosaicos a serem utilizados nas análises das culturas.

Com o objetivo de medir características fenotípicas na lavoura do milho, Su *et al.* (2019) utilizaram dados da RPA. Segundo Chawade *et al.* (2019), a fenotipagem busca identificar plantas que apresentem melhores características com o objetivo de melhoramento genético. No entanto, também é utilizada para monitoramento de culturas e identificação de problemas como a necessidade de fertilizantes ou detecção plantas daninhas.

Grenzdörffer (2014), mediu a altura do milho por meio da correlação existente entre observações de campo e um índice de vegetação calculado a partir de imagens obtidas a partir da RPA.

Anthony *et al.* (2014), propôs estimar a altura do milho em tempo real utilizando-se de um algoritmo e escaneamento a *laser* embarcado na RPA. A altura do milho seria o resultado da determinação da distância entre o solo e a parte mais alta do dossel. Entretanto, quando a cultura apresenta um determinado grau de densidade a técnica limitou-se a estimar a altura apenas em locais onde o feixe de energia conseguiu atingir o solo.

Buchailot *et al.* (2019), avaliaram índices de vegetação em áreas de plantio de milho, sob os efeitos de estresse hídrico e baixa concentração de Nitrogênio. Os índices calculados que apresentaram maior correlação com a produtividade foram o Índice de Área Verde (Green Area Index - GAI) e o Índice de Área Queimada (Char Soil Index - CSI).

Com uma câmera MiniMCA (Tetracam Inc) de 12 bandas do espectro eletromagnético, Hermann *et al.* (2019) obtiveram imagens RPA para avaliação de rendimento e identificação de estádios fenológicos por meio de modelos criados utilizando-se de dados espectrais. O melhor modelo gerado foi o referente ao estágio reprodutivo R2 da planta de milho.

Gnädinger e Schmidhalter (2017), aplicaram técnicas de modificação de contraste em imagens obtidas pela RPA, antes de efetuarem processos de contagem digital do número de plantas de milho. A contagem do número de plantas é utilizada como procedimento para realização da estimativa de produtividade.

Viña *et al.* (2004), utilizaram-se do índice de vegetação VARI para avaliar o desenvolvimento fenológico do milho. O índice supracitado permitiu o monitoramento da cultura, a estimativa de biomassa, mudanças provocadas pelo aparecimento dos

orgão reprodutivos, identificação do início do enchimento de grãos e início da senescência do dossel vegetativo.

Guo *et al.* (2021), utilizaram índices espectrais para detectar a resposta da vegetação em áreas desérticas utilizando-se de imagens RGB. De acordo com Vergara-Díaz *et al.* (2016), índices de vegetação calculados a partir dos comprimentos de onda da região do visível podem ser utilizados para quantificar a concentração de nitrogênio nas folhas das plantas de milho.

Zhu *et al.* (2019b) utilizaram nuvens de pontos 3D geradas a partir sensores RGB, Multiespectral e *Light Detection And Ranging* (LIDAR) embarcados em diferentes RPAs para estimar a biomassa na cultura do milho. Segundo Tsouros, Bibi e Sarigiannidis (2019), o cálculo de biomassa e informações sobre teores de nitrogênio são os principais parâmetros para determinar a necessidade de aplicação suplementar de fertilizantes ou outras ações na cultura do milho.

Bendig *et al.* (2014), propuseram uma metodologia para estimativa da biomassa na agricultura. O modelo MDT é gerado com os dados do levantamento antes da semeadura para que posteriormente possa ser comparado com os modelos criados ao longo do ciclo fenológico da cultura. Obtêm-se assim a altura do cultivo por meio da subtração entre o modelo base representando o terreno (MDT) e os modelos MDE.

Niu *et al.* (2019), estimaram a altura da cultura do milho nos estádios de desenvolvimento V5 e V7 diretamente de nuvens de pontos obtidas pelo processamento de fotos captadas a uma altura de voo de 30 m e sobreposição de 90% por uma RPA DJI Phantom 4 Pro.

A aplicação de algoritmos SfM a imagens RGB obtidas a partir da RPA é uma forma adequada de estimar a altura da vegetação desde que seja visível uma parcela considerável do solo, além de ser uma alternativa de menor custo quando comparada a tecnologia LIDAR (MAES; STEPPE, 2019).

Segundo Wang *et al.* (2020), as plantas podem ser demonstradas tridimensionalmente usando mapas de profundidade, malhas de polígonos, *voxels* ou nuvens de pontos. Estas podem ser obtidas por meio da tecnologia SfM.

Desta forma, a comparação entre nuvens de pontos geradas em diferentes datas da mesma área de estudo, conforme o ciclo fenológico da cultura, possibilita estimar o grau de desenvolvimento em que esta se encontra, devido as diferenças apresentadas nos momentos da série temporal.

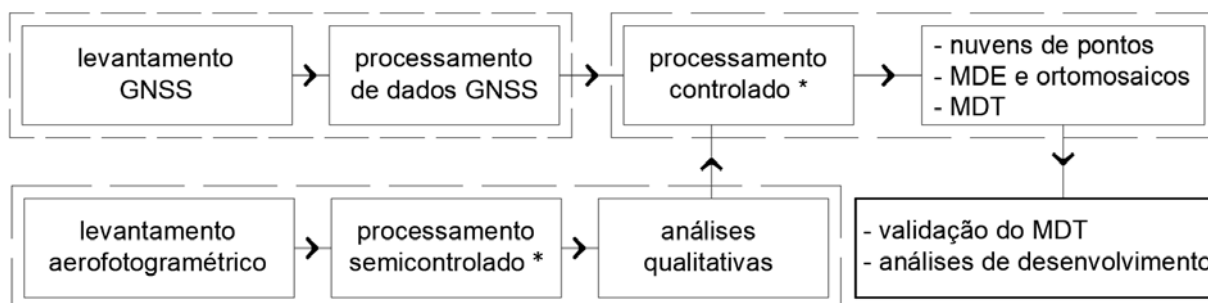
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo é composta por técnicas de Aerofotogrametria e de Processamento Digital de Imagens (PDI), aplicadas as séries temporais de fotos coletadas por meio da RPA. Definiu-se os processamentos de dados e seus parâmetros a partir de análises qualitativas das imagens e observando-se a literatura quanto à determinação de parâmetros biofísicos, conforme o desenvolvimento do ciclo fenológico do milho.

A metodologia proposta foi empregada na área de estudo do projeto “Modelos para diagnóstico de processos erosivos em solos agrícolas”, financiado pela Fundação Araucária e pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR). Inseriu-se a lavoura de milho no interior das megaparcelas¹ como cultura de rotação no processo de cobertura para proteção do solo.

As etapas fundamentais dos trabalhos de campo e do processamento dos dados, estão representados no diagrama da Figura 9 e desenvolvidos nas subseções posteriores.

Figura 9 - Etapas elementares de realização do método



Fonte: O autor.

Nota: Processamento semicontrolado e controlado referem-se respectivamente ao processamento das fotos aéreas utilizando-se somente dos dados posicionais absolutos provenientes do GNSS da RPA e utilizando-se dos pontos GNSS coletados em campo e pós-processados.

Utilizando-se trena métrica graduada, amostras da altura das plantas de milho foram medidas do nível do solo até a inserção do limbo foliar da última folha nos estádios fenológicos V3, V6 e R1. Determinou-se a amostragem para medição das alturas das plantas do dossel com base na densidade da cultura (60.000 plantas/ha). Desta forma, para uma parcela plantada, escolheu-se 10 indivíduos aleatoriamente

¹ Megaparcelas: Locais delimitados em áreas rurais com aproximadamente dois hectares cada e instalados aos pares (uma com terraços e outra sem), com o objetivo de coletar dados sobre processos erosivos, a fim de subsidiar projetos da Rede Paranaense de Agropesquisa (CNA, 2021).

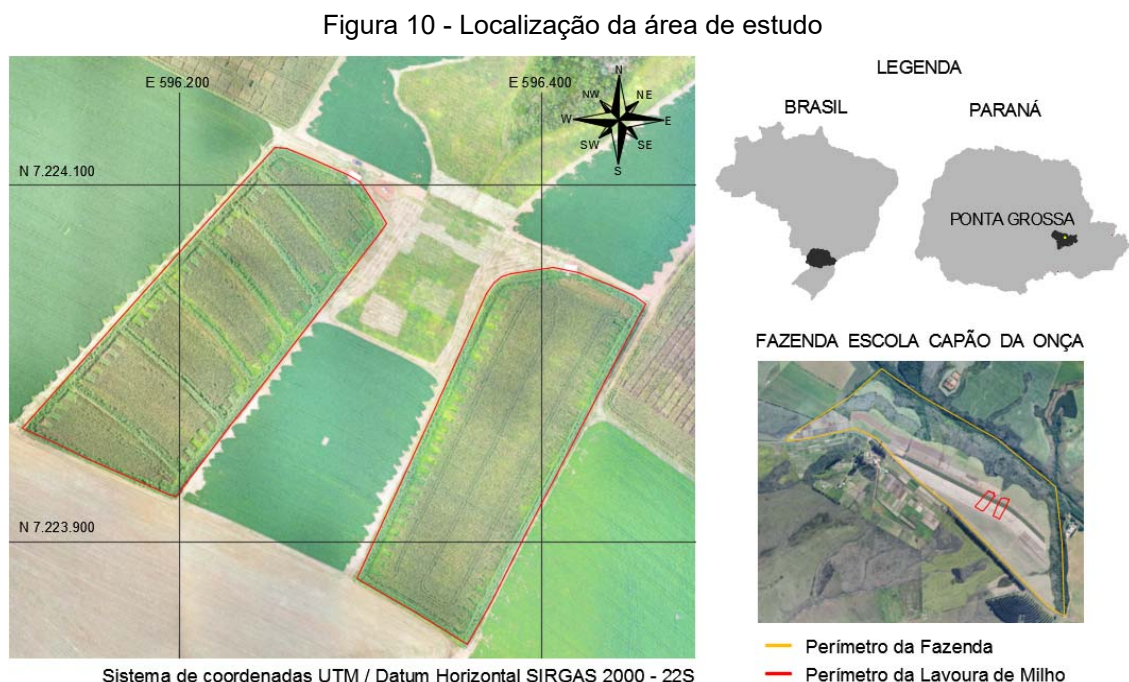
em campo (BRACHTVOGEL *et al.*, 2012). A partir das medidas amostrais foram obtidas as médias de altura.

Realizou-se os levantamentos aerofotogramétricos de maneira autônoma por meio de programa específico que também é usado para o planejamento de voo. Para processamento das séries temporais de imagens de cada voo e posterior validação do MDT, foram utilizados pontos de controle e de checagem obtidos a partir de equipamentos GNSS portadoras L1/L2 e de *software* específico para correção das linhas de base.

As análises de crescimento e desenvolvimento para data de voo que corresponde a um momento da cultura, foram realizadas por meio da aplicação de índices de vegetação e determinando-se a altura média do dossel. Ao final das análises realizadas, encontra-se uma sumarização das etapas de cada experimento.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

As megaparcelas encontram-se dentro da Fazenda Escola Cação da Onça - FESCON, pertencente a Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), localizada no município de Ponta Grossa, estado do Paraná / Brasil, conforme a Figura 10.



Fonte: O autor.

Nota: A planta de localização apresenta as áreas de estudo delimitadas pelas linhas em vermelho (Megaparcelas) no interior da Fazenda Escola Capão da Onça. A Figura é resultado da geração de ortomosaico a partir de fotos tomadas pelo sensor L1D-20c no dia 13/02/2020.

A região onde a área de estudo está inserida, caracteriza-se por apresentar pluviosidade anual entre 1400 e 1800 mm (CRUZ, 2007). Segundo dados do Instituto das Águas do Paraná do ano de 2019, a pluviometria média registrada pela estação de controle Itaiacoca foi de 1457,8 mm (ÁGUAS PARANÁ, 2020).

A área caracteriza-se por apresentar relevo suave ondulado com pendentes onde a declividade apresenta de 5 a 7% (FERREIRA, 2011) e o tipo de solo Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2013).

3.2 ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

- Trena métrica graduada. Utilizou-se para verificação da altura das plantas.
- GCPs com as dimensões de 0,6 x 0,6 metros, distribuídos pela área de estudo para indicar os locais com coordenadas GNSS precisas.
- GNSS Trimble R4 de dupla frequência (portadoras L1/L2) com suporte para conexão com os sistemas GPS e GLONASS de precisão pós-processado.
- RPA rotor quadricóptero Mavic 2 Pro (SZ DJI Technology) com autonomia operacional máxima de 31 min e sensor GNSS para realização dos voos.
- Câmera L1D-20c Hasselblad RGB, com resolução máxima 5472x3648 pixels e distância focal de 10.26 mm. Embarcada na RPA para tomada das fotos.
- Programa *Trimble Business Center*: processamento preciso dos pontos GNSS.
- Programa *DroneDeploy*: planejamento e realização dos planos de voo.
- Programa *Agisoft Metashape*: processamento aerofotogramétrico e elaboração das nuvens de pontos, MDEs, MDT, ortomosaicos e validação.
- Programa *CloudCompare*: análises de altura da cultura.
- Programa *Excel*: cálculo das estatísticas descritivas de altura e dos valores dos índices de vegetação.
- Programa *ENVI*: processamento digital de imagens.
- Programa *ArcMap*: determinação de pontos homólogos e validação.
- Programa *Minitab* para verificação da normalidade dos dados e cálculo da correlação de spearman.

3.3 ETAPAS DE REALIZAÇÃO DO MÉTODO

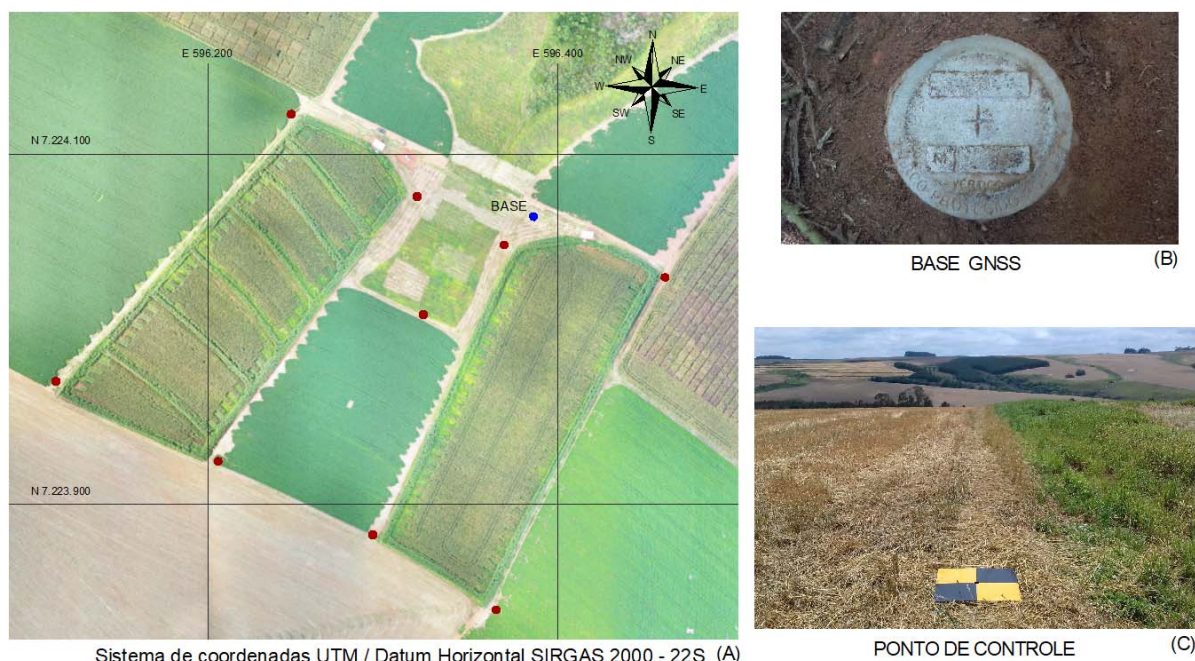
Nesta seção, são apresentados os procedimentos para o levantamento em campo dos pontos de controle e das imagens aéreas, bem como as fases de processamento aerofotogramétrico para a obtenção das nuvens de pontos e a validação do MDT. A partir das nuvens de pontos e do MDT validado, realizaram-se as análises de crescimento e desenvolvimento da cultura do milho.

3.3.1 Levantamento GNSS dos pontos de controle

Inicialmente determinou-se os locais de inserção dos marcos no solo para que estes passassem a constituir os pontos de controle do projeto “Modelos para diagnóstico de processos erosivos em solos agrícolas” da Fundação Araucária/SENAR. Por meio de um croqui elaborado no programa *ArcMap*, definiu-se 10 pontos, posteriormente levantados com GNSS de dupla frequência portadoras L1/L2.

Buscou-se durante a implantação dos pontos do projeto a melhor distribuição, escolhendo-se locais centrais e extremos da área de estudo. A Figura 11 apresenta a distribuição espacial da base e dos GCPs em campo, bem como suas representações.

Figura 11 - Distribuição espacial e representação dos pontos de controle



Fonte: O autor.

Nota: Apresenta-se por meio da Figura 11A a posição da base e a distribuição espacial dos pontos de controle do projeto em relação a área de estudo, bem como suas representações por meio das Figuras 11B e 11C.

O método GNSS foi o relativo estático para levantamento da base. Realizou-se o rastreamento GNSS do marco por um período superior a 4 horas. Para o levantamento dos GCPs, definiu-se suas localizações e realizou-se o rastreamento pelo método relativo estático rápido, por um período de pelo menos 10 minutos. O receptor GNSS utilizado foi o Trimble R4.

Corrigiu-se as linhas de base conforme a estação da UFPR em Curitiba (localizada a uma distância menor que 150 Km da área de levantamento), utilizando-se para o processamento dos dados o programa Trimble Business Center.

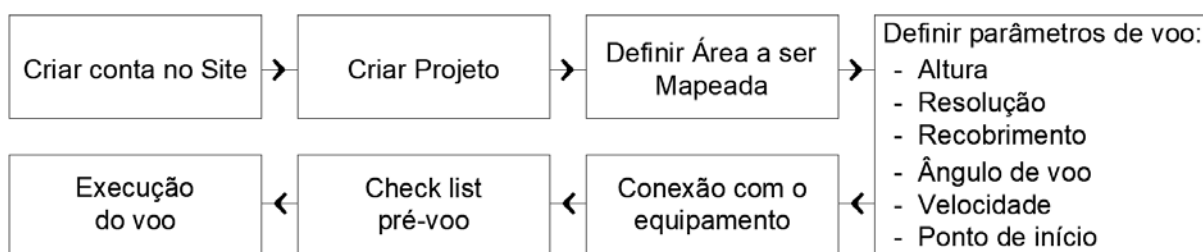
Desta forma, referenciaram-se posteriormente as séries temporais de imagens obtidas pela RPA ao datum SIRGAS 2000, inserindo-se os pontos pós-processados no processo de ajustamento em bloco do programa *Agisoft Metashape*, calculando-se assim produtos digitais controlados.

3.3.2 Levantamento aerofotogramétrico

Os levantamentos aerofotogramétricos foram realizados utilizando-se de planos de voo elaborados por meio do programa gratuito *DroneDeploy*. O APP suporta os sistemas Android e iOS e é compatível com a aeronave DJI Mavic 2 Pro.

Assim, na etapa de definição e elaboração dos parâmetros de voo, não é necessário levar-se em conta parâmetros do equipamento RPA. A Figura 12 representa as etapas para criação e execução do plano de voo no programa supracitado.

Figura 12 - Sequência do planejamento de voo

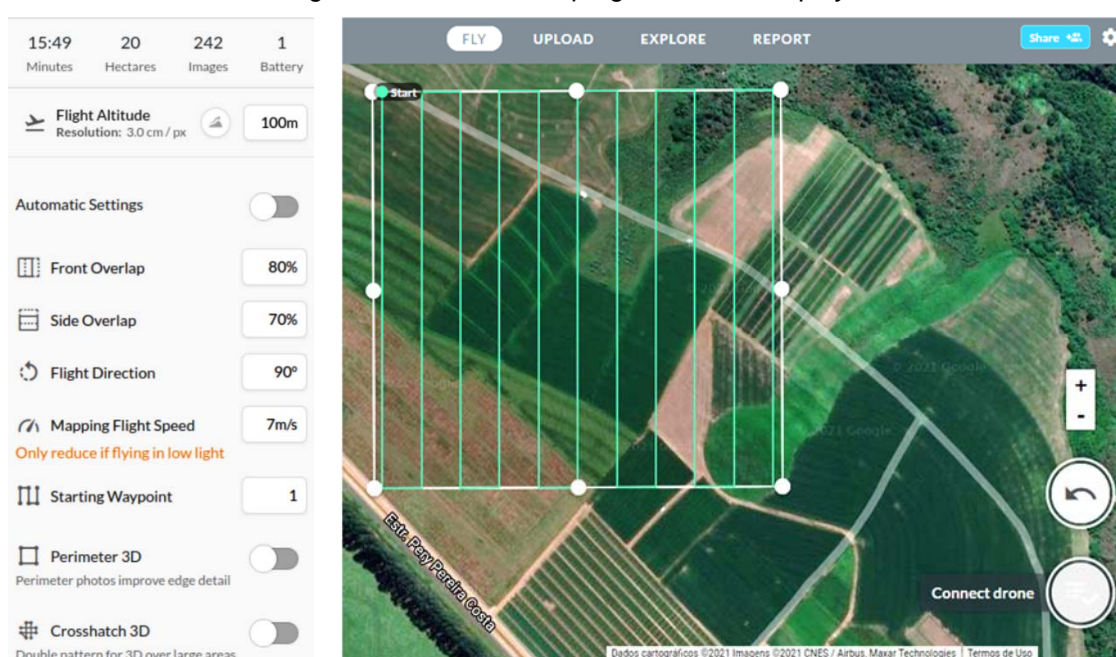


Fonte: O autor.

Nota: O diagrama representado na Figura 12 refere-se ao planejamento de voo por meio do APP Drone Deploy que é compatível com equipamentos fabricados com a empresa SZ DJI Co Lta. Variações na sequência de planejamento de voo podem ocorrer utilizando-se de outros programas compatíveis com a RPA.

As soluções para planejamento de voo por meio de aplicativos móveis são intuitivas e interativas. Depois de desenhado o polígono da área de interesse por meio de toques na tela do *Smartphone* basta inserir os parâmetros de voo. A medida em que estes são inseridos, as linhas e as estimativas para a execução do levantamento são automaticamente calculadas (tamanho da área de imageamento, duração, consumo de bateria e *Ground Sample Distance* (GSD)). Exemplifica-se por meio da Figura 13 um plano de voo elaborado a partir da interface do programa *DroneDeploy*.

Figura 13 - Interface do programa *DroneDeploy*



Fonte: O autor.

Nota: Apresenta-se as principais informações para elaboração do plano de voo no programa.

Desta forma, criou-se o plano de voo para a altura de 100 metros, com recobrimento de 70% lateral e 80% longitudinal, que foi executado em 5 dias diferentes, observando-se aspectos dos momentos representativos, conforme o ciclo fenológico do milho.

Os voos para obter-se as fotografias aéreas verticais realizaram-se de forma totalmente autônoma não se possibilitando, durante a execução do algoritmo, qualquer ajuste ou alteração dos parâmetros previamente estabelecidos.

No primeiro voo, buscou-se registrar por meio das fotos aéreas um dos estádios iniciais de desenvolvimento das plantas e dados para geração do MDT que seria utilizado nas análises. Com os voos posteriores, obteve-se as imagens

referentes a outros dois estádios vegetativos e dois estádios reprodutivos da cultura. A Tabela 1 demonstra as datas de levantamento e o estádio correspondente da cultura do milho.

Tabela 1 - Levantamentos Aerofotogramétricos da cultura do milho

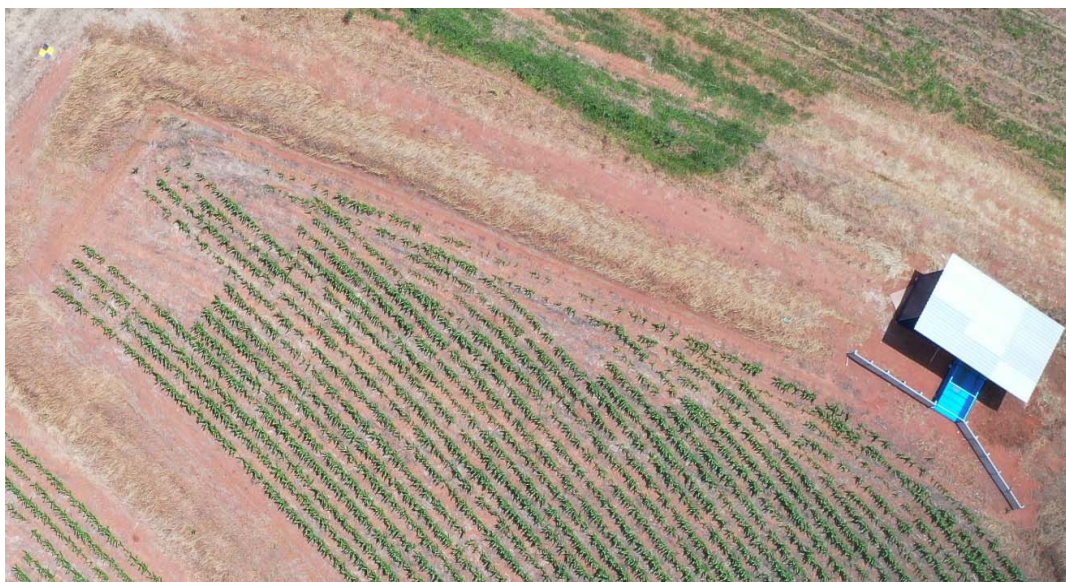
Datas	Horários	Estádios Fenológicos
01/11/2019	11:18:48	V2-V3
20/11/2019	11:35:16	V6-V7
13/12/2019	14:35:14	V9-V10
10/01/2020	14:18:52	R1-R2
13/02/2020	16:46:28	R5-R6

Fonte: O autor.

Nota: Apresenta-se datas, horários, alturas de voo e estádios do milho.

Verificou-se que o plano de voo criado, permitiu a obtenção de produtos com qualidade adequada, fornecendo boa relação entre o recobrimento necessário das fotos, custo computacional e fornecimento de detalhes do objeto de estudo. A Figura 14, exemplifica uma imagem adquirida por meio do sensor RGB embarcado na RPA a uma altura de 100 m do solo. As propriedades das imagens como brilho e contraste são originais. Trata-se de uma imagem sem processamento.

Figura 14 – Imagem coletada pela RPA a 100 m de altura



Fonte: O autor.

Nota: Imagem representativa do estádio de desenvolvimento V6 da cultura do milho a uma altura de 100 metros. Percebe-se que neste estádio as linhas de plantio são facilmente delimitadas.

As placas de 0,6 x 0,6 metros, colocadas sobre os marcos do projeto, possibilitaram o posterior processamento das séries temporais de imagens com a

utilização de coordenadas GNSS pós-processadas, por meio de marcações do mesmo em fotografias consecutivas.

3.3.3 Geração das nuvens de pontos

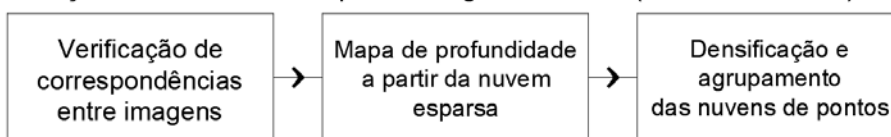
Realizou-se o processamento aerofotogramétrico das nuvens de pontos em fases, conforme o fluxo de trabalho do programa Agisoft Metashape (Figura 15). Este inicia-se pela aplicação de um algoritmo para determinação de correspondências entre as imagens baseando-se nas sobreposições determinadas no plano de voo e segue com a aplicação do algoritmo SfM-MVS.

Figura 15 - Diagrama de processamento SfM-MVS das nuvens de pontos

Fototriangulação a partir de algoritmos SfM (Structure from Motion)



Geração da nuvem densa a partir de algoritmos MVS (Multi-View Stereo)



Fonte: O autor.

Nota: Demonstra-se na figura o fluxo de trabalho simplificado, conforme implementação desenvolvida pela Agisoft.

Inicialmente, identifica-se visualmente nas fotos aéreas de uma determinada data de voo, os 10 GCPs anteriormente obtidos nos trabalhos de campo e materializados durante o voo com as placas de 0,6 x 0,6 m., conforme sua representação na Figura 14.

Assim, as imagens levantadas foram submetidas ao processo de alinhamento com o parâmetro de acuracidade em modo elevado (tradução para *Highest*). Desativou-se o parâmetro de pré-seleção de pares e definiu-se a quantidade máxima de 40.000 e mínima de 4.000 pontos correspondentes entre as áreas de recobrimento definidas no plano de voo.

Partindo-se dos pontos obtidos, aplicou-se o algoritmo SfM para estimar simultaneamente a geometria tridimensional dos pontos, a posição e a orientação das câmaras no instante da tomada de cada foto. No final desta função estimou-se, pelo

próprio *software*, os parâmetros de orientação interior: distância focal (f), coordenadas dos pontos principais (c_x e c_y), coeficientes de distorção radial (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) e coeficientes de distorção tangencial (p_1 , p_2 , p_3 e p_4).

O processo de obtenção da nuvem esparsa termina com a função de ajustamento em bloco, seguida da otimização do posicionamento e da geometria tridimensional.

Sequencialmente, obteve-se a nuvem densa de pontos das megaparcelas referentes a cada um dos 5 dias de levantamento (voos a 100 metros de altura), utilizando-se do algoritmo MVS com o parâmetro de qualidade em modo elevado. Setou-se o campo de filtragem em modo agressivo.

Baseando-se na nuvem esparsa e nas posições relativas das câmaras, calcula-se assim as estimativas de profundidade para cada imagem e ocorre a combinação dos pontos em um única nuvem.

A nuvem para elaboração do MDT foi gerada com baixo nível de processamento MVS, objetivando-se a obtenção de menos pontos tridimensionais e conseqüentemente fosse atenuada a influência da palhada sobre o solo, quando da elaboração do MDT.

Finalmente, os pontos das nuvens referentes as plantas de milho, obtidas conforme sua respectiva data de levantamento, foram selecionadas por meio de um polígono e exportadas separadamente em formato texto para posterior realização de análises de desenvolvimento, conforme exemplificado no quadro 6.

Quadro 6 - Exemplo dos dados existentes em um arquivo texto

Ponto	Coordenada N	Coordenada E	Altitude	R	G	B
544295	7223997,64	596178,05	1024,51	161	192	120
544296	7224001,31	596173,35	1024,43	182	209	152
544297	7223991,37	596177,11	1024,86	149	188	124
544298	7224000,03	596172,04	1024,57	177	208	150
544299	7223996,96	596161,67	1025,11	168	199	130

Fonte: O autor.

Nota: Onde os valores de RGB encontram-se em Níveis digitais.

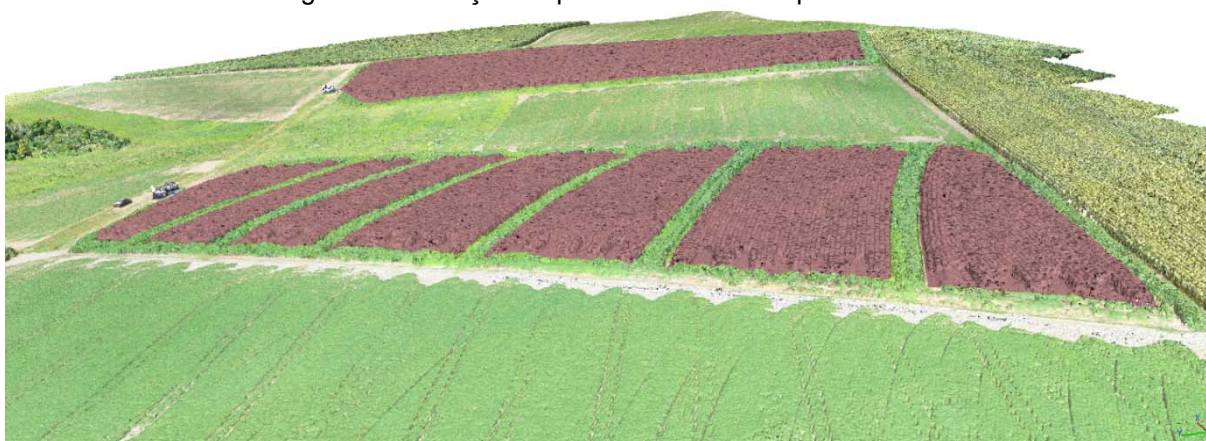
Exemplifica-se por meio da Figuras 16, 17 e 18, a nuvem de pontos obtida pelo algoritmo SfM-MVS por meio do processamento das imagens obtidas no levantamento do dia 10/01/2020, bem como a seleção de pontos das plantas de milho e a nuvem recortada, respectivamente, pronta para exportação.

Figura 16 - Nuvem de pontos em perspectiva (Estádio R1)



Fonte: O autor.

Figura 17 - Seleção de pontos de interesse para análise



Fonte: O autor.

Figura 18 - Recorte da nuvem para exportação em formato texto



Fonte: O autor.

3.3.4 Obtenção e validação do MDT

Aplicou-se o processo de classificação para extração de pontos relativos ao solo na nuvem densa de pontos obtida pelo processamento das fotos da data de

01/11/2019 com a ferramenta *Classify Ground Points*. A partir destes elaborou-se dois MDT de estrutura vetorial triangular, utilizando-se do processamento *Build Mesh*.

Escolheu-se as imagens do levantamento realizado na data supracitada para o processamento do MDT, porque as plantas de milho estavam com baixa estatura permitindo-se a elaboração de um modelo com pouca influência de pontos tridimensionais que representavam as plantas de milho.

A técnica *Build Mesh* gera uma malha que representa a variável numérica altimétrica a partir de uma Rede Irregular de Triângulos. Definiu-se o parâmetro de contagem de faces (tradução para *Face count*) como elevado, obtendo-se uma malha com as características do terreno na data do levantamento das fotos aéreas.

O objetivo da elaboração do MDT é eliminar os objetos que estejam acima do nível do solo, obtendo-se uma superfície que permita a aferição do crescimento do milho. O modelo gerado foi exportado para o formato *.obj*, utilizado para intercâmbio de dados tridimensionais entre diferentes programas (FILEFORMAT.INFO, 2020).

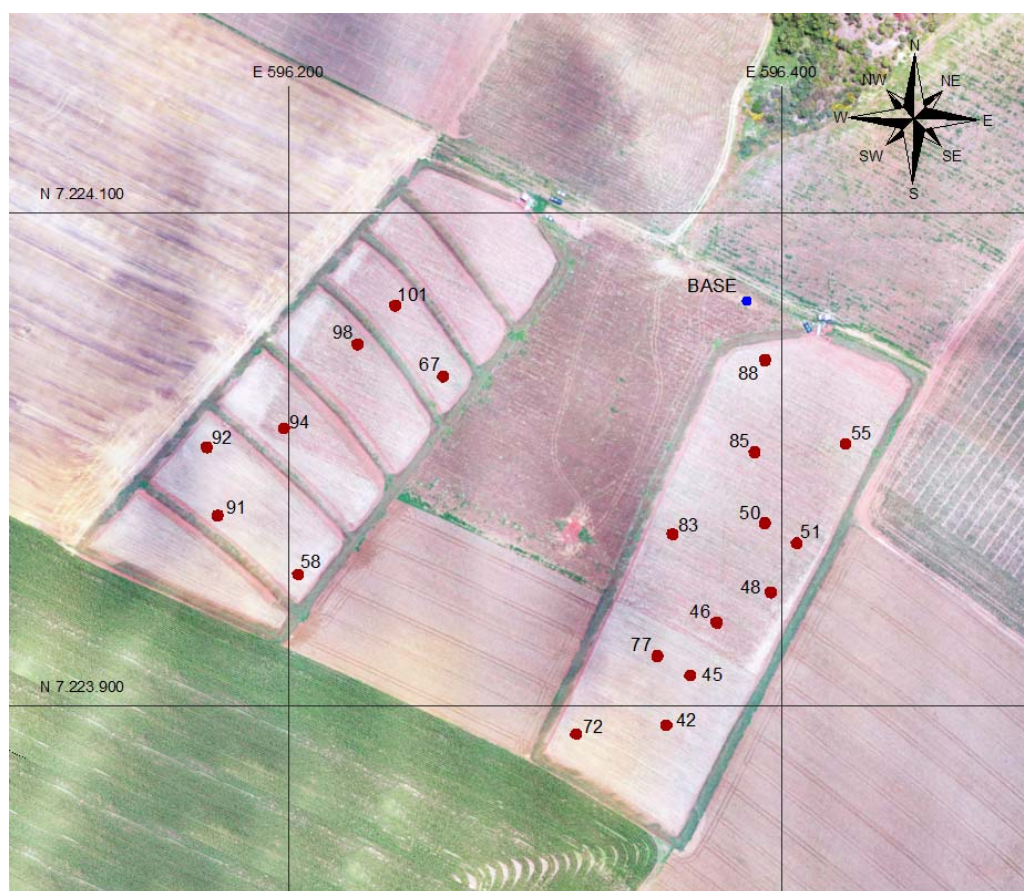
Depois de elaborado, o MDT passou pelo processo de validação para ser usado como base para as análises de crescimento do milho. Para o cálculo dos valores de referência do Erro Máximo (EM) e do Erro Padrão (EP) com posterior enquadramento do produto cartográfico conforme as normas do decreto 89.8170/84, necessitou-se de pontos com coordenadas conhecidas e de seus respectivos pontos homólogos.

Desta forma, pontos de checagem foram levantados em campo. O método GNSS utilizado para levantar a base foi o estático (com ocupação do ponto por um período superior a 4 horas) e para levantar a grade foi o método estático rápido (onde o período de ocupação foi de aproximadamente 6 minutos em cada ponto), conforme preconizado no projeto.

Corrigiu-se a base utilizando-se do serviço on-line para pós-processamento de dados GNSS disponibilizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) denominado Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).

O serviço é online e gratuito, permitindo determinar coordenadas referenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro em SIRGAS 2000 (IBGE, 2020). Para o processamento das linhas de base e correção dos dados utilizou-se o programa Trimble Business Center. A Figura 19 demonstra a localização dos pontos de checagem para validação do MDT.

Figura 19 - Pontos de checagem para validação.



Sistema de coordenadas UTM / Datum Horizontal SIRGAS 2000 - 22S

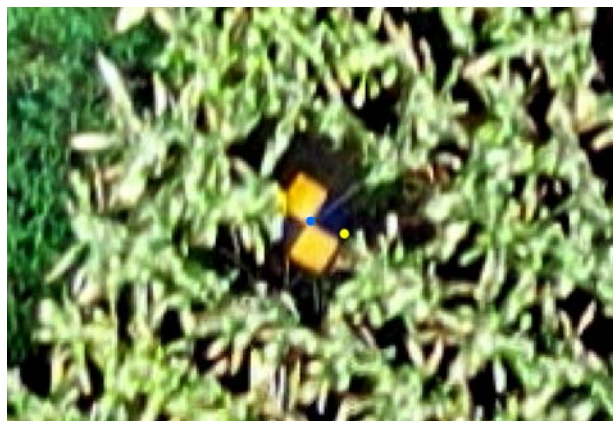
Fonte: O autor.

De posse das coordenadas conhecidas (pontos de checagem com coordenadas pós-processadas), determinou-se as coordenadas para teste (extraídas do ortomosaico ou MDT). Para verificação dos valores N e E destes pontos homólogos, foram utilizados dois ortomosaicos referentes as datas de 01/11/2019 e 13/02/2020.

Após a aplicação de transformações lineares visando melhorar a visualização de alvos sobre as imagens, os ortomosaicos foram inseridos no *software ArcMap* e os respectivos valores das coordenadas N e E teste foram aferidos. A Figura 20 demonstra a verificação das coordenadas teste de dois pontos escolhidos para checagem.

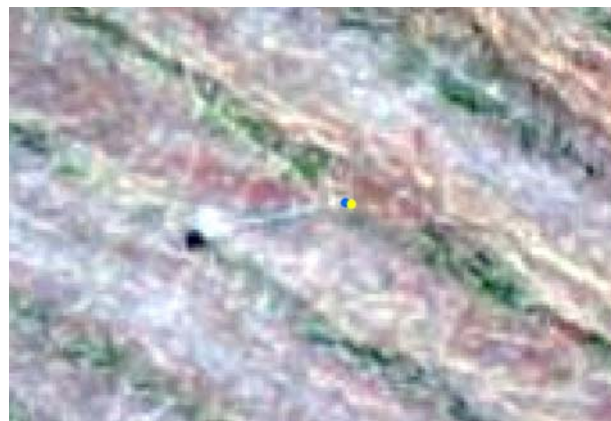
Figura 20 - Extração de pontos de checagem

Placa de 0,6 x 0,6 em meio a cultura



A

Marcas numeradas da grade em solo



B

Fonte: O autor.

Nota: Obtenção de pontos homólogos para validação. Na Figura 22A o ponto de checagem é representado pela estaca e a placa de 0,6 x 0,6 m e na Figura 22B por uma das marcas da linha de grade. Os pontos amarelos representam as coordenadas pós-processadas e os pontos azuis as coordenadas teste, inserida em uma camada no programa *ArcMap*.

Com as coordenadas conhecidas e após determinar-se as coordenadas para teste, estas foram submetidas ao cálculo da acurácia posicional utilizando planilha de cálculo, conforme proposto por Sampaio e Brandalize (2018), utilizando-se das fórmulas (3) e (4).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{[f(x_i) - x_i]^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSEr = \sqrt{(RMSEx)^2 + (RMSEy)^2} \quad (4)$$

Realizando-se os cálculos, pode-se verificar o enquadramento do produto cartográfico, por meio dos valores do RMSE nas tabelas padronizadas PEC-PCD.

3.3.5 Análises por meio de índices de vegetação

Aplicando-se as fórmulas dos índices de vegetação NGRDI (5), GLI (6), RGBVI (7), NGBI (8) e VARI (9) nas nuvens de pontos que representam as diferentes fases de crescimento do milho buscou-se separar por classificação pontos referentes ao solo, palhada e a lavoura de milho.

Para o cálculo dos índices, inicialmente utilizou-se a calculadora raster do programa *Agisoft Metashape*. A seguir apresentamos o Quadro 7 com as fórmulas dos índices de vegetação supracitados, onde B1, B2 e B3 correspondem respectivamente aos comprimentos de onda do vermelho, verde e azul.

Quadro 7 - Fórmulas dos índices de vegetação

Índice de Vegetação	Fórmula matemática	
NGRDI (TUCKER <i>et al.</i> , 1979)	$(B2-B1) / (B2+B1)$	(5)
GLI (LOUHAICHI <i>et al.</i> , 2001)	$(2*B2-B1-B3) / (2*B2+B1+B3)$	(6)
RGBVI (BENDIG <i>et al.</i> , 2015)	$B2^2 - (B1*B3) / B2^2 + (B1*B3)$	(7)
NGBI (MICHEZ <i>et al.</i> , 2018)	$(B2-B3) / (B2+B3)$	(8)
VARI (GITELSON <i>et al.</i> , 2002)	$(B2-B1) / (B2+B1-B3)$	(9)

Fonte: O autor.

Gerou-se assim classificações mediante os índices de vegetação que fornecem valores entre -1 e 1, onde quanto mais próximo de -1 tem-se nula atividade fotossintética (solo e palhada) e quanto mais próximo de 1 maior atividade fotossintética (plantas).

Os pontos das nuvens são desta forma rotulados em função do valor obtido com a execução de um determinado índice de vegetação. Assim, seleciona-se os pontos que representam solo e palhada pelas cores (pontos com baixo índice de vegetação) por meio da técnica “Seleção de pontos por cores” (tradução para *Select Points by Color*). Uma abordagem similar para extração de dados referentes a superfície do solo em nuvens de pontos foi utilizada por Herrero-Huerta *et al.* (2020), porém sem a utilização de índices de vegetação.

Após a seleção, os pontos indesejados são deletados e a nuvem é exportada para o formato texto. A exportação somente de pontos que apresentam atividade fotossintética, atenua a presença de *outliers* ou ruído de processamento na estimativa de altura do dossel e na análise estatística. A separação para cálculo da altura média do dossel foi realizada por meio do índice GLI para toda a área das megaparcelas.

Realizou-se também a avaliação qualitativa do desenvolvimento do milho por meio da atividade da clorofila no dossel da cultura, aplicando-se o índice NGRDI a dois recortes extraídos de cada nuvem de pontos referente a cada um dos estádios

analisados. Este experimento baseia-se nos trabalhos de Tucker (1979) e Motohka (2010), por meio dos quais demonstrou-se que o índice supracitado é um bom indicador fenológico, apresentando também potencial para estimativa de biomassa (BENDIG *et al.*, 2015, apud HUNT *et al.*, 2005).

Apresenta-se por meio da Figura 23, os recortes A e B criados utilizando-se de um ortomosaico e do programa *ArcMap*.

Figura 21 - Recortes A e B.



Sistema de coordenadas UTM / Datum Horizontal SIRGAS 2000 - 22S

Fonte: O autor.

Depois dos polígonos envolventes terem sido criados (polígonos A e B), o referido plano de informação foi inserido no programa Agisoft Metashape. Seguiu-se a seleção dos dois recortes por meio da técnica “Seleção por corte” (tradução para *Crop Selection*) e a eliminação dos pontos exteriores ao polígono. Posicionou-se aleatoriamente os recortes utilizando-se dos seguintes critérios: local com maior quantidade de palhada sobre o solo (Recorte A) e local com pouca palhada sobre o solo (Recorte B).

Devido a grande quantidade de pontos existentes nas nuvens, realizou-se os recortes A e B, para a realização das análises por meio de índices de vegetação. Cita-se como exemplo, a nuvem de pontos obtida para o computo das alturas da cultura em estágio V3 que totaliza 14.279.960 de pontos, número que supera em muito a quantidade de linhas de uma planilha eletrônica, utilizada para realização dos cálculos dos índices finais e das respectivas estatísticas descritivas.

Posteriormente as medidas de tendência central e desvio padrão calculadas por meio de planilha eletrônica, foram conferidas quando da execução dos testes de Kolmogorov-Smirnov (Teste KS) para verificação da normalidade dos dados, utilizando-se do programa estatístico Minitab.

3.3.6 Análise por meio das distâncias euclidianas no eixo Z

Para realizar-se a análise de desenvolvimento das plantas de milho a partir da estimativa de estatura, utilizou-se das nuvens de pontos e do MDT TIN.

Assim, estimou-se o crescimento da cultura utilizando-se da técnica da determinação da distância euclidiana do eixo Z, de uma mesma área definida pelos eixos X e Y, entre o MDT e as nuvens de pontos, pelas quais representa-se o dossel. Para tanto, o MDT e pontos das nuvens referentes as plantas de milho, foram inseridos no programa CloudCompare.

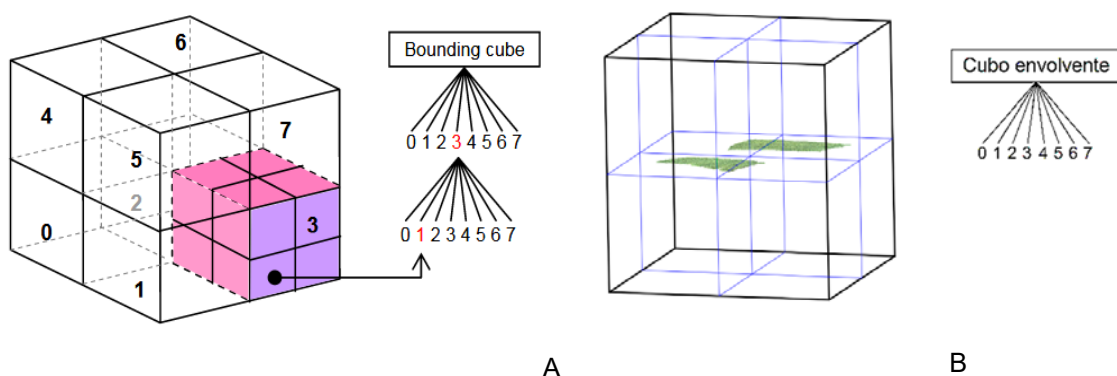
Considerando-se o modelo MDT como referente a superfície do solo e as nuvens de pontos como representações do dossel, avaliou-se quantitativamente, a altura da lavoura com a técnica *Compute cloud/mesh distance* do programa CloudCompare. Trata-se de uma análise fundamentada na distância de *Hausdorff*, conforme implementação desenvolvida por Girardeau-Montaut (2015).

Executando-se o cômputo, inicialmente ocorre a divisão recursiva do espaço tridimensional, delimitando-se estruturalmente a nuvem de pontos em cubos equivalentes pela metade, em cada eixo tridimensional. Em seguida, realiza-se os cálculos das distâncias euclidianas do vizinho mais próximo entre um ponto e a superfície do MDT.

Visualiza-se pela Figura 22A, esta estrutura em árvore denominada *Octree*. O cubo delimitante (tradução para *bounding cube*) se refere a raiz da estrutura em árvore que envolve toda a nuvem 3D. Os cubos imediatamente menores, numerados de 0 a 7, representam a subdivisão do espaço tridimensional de primeiro nível da árvore onde

cada nó possui 8 elementos. O cubo em cor magenta, representa a subdivisão do cubo número 3 em um segundo nível. Gera-se a cada nova subdivisão do espaço seus respectivos 8 elementos.

Figura 22 – Estrutura em árvore *Octree*



Fonte: Girardeau-Montaut, 2005

Fonte: O autor, 2021

Nota: A estrutura *Octree* tem por objetivo acelerar o processamento dos dados, antes de calcular a distância entre os pontos e a malha TIN.

Exemplifica-se pela Figura 22B, a estrutura *Octree* gerada para o cálculo da distância euclidiana do eixo Z, entre o MDT e os pontos que representam o dossel da cultura em um dos estádios analisados. As linhas na cor preta no cubo referem-se a raiz e, as linhas em azul a subdivisão de primeiro nível em 8 cubos menores (numerados de 0 a 7) da estrutura *Octree*. Após a construção dos cubos, ocorre o cálculo das distâncias euclidianas, utilizando-se do algoritmo de *Hausdorff*, conforme a equação (10):

$$d(p, S') = \min_{p' \in S'} \|p - p'\|_2 \quad (10)$$

Onde calcula-se para cada ponto p da nuvem S a distância até o ponto mais próximo da outra nuvem S' e $\|p - p'\|_2$ refere-se a normal euclidiana.

No caso deste trabalho como não são comparadas duas nuvens de pontos, o programa considera para cálculo da distância um vetor normal local entre os pontos da nuvem e a superfície do MDT TIN. Desta forma será calculada a altura da cultura, determinando-se as distâncias entre os pontos da nuvem e o triângulo mais próximo existente no modelo, como demonstrado na Figura 23.

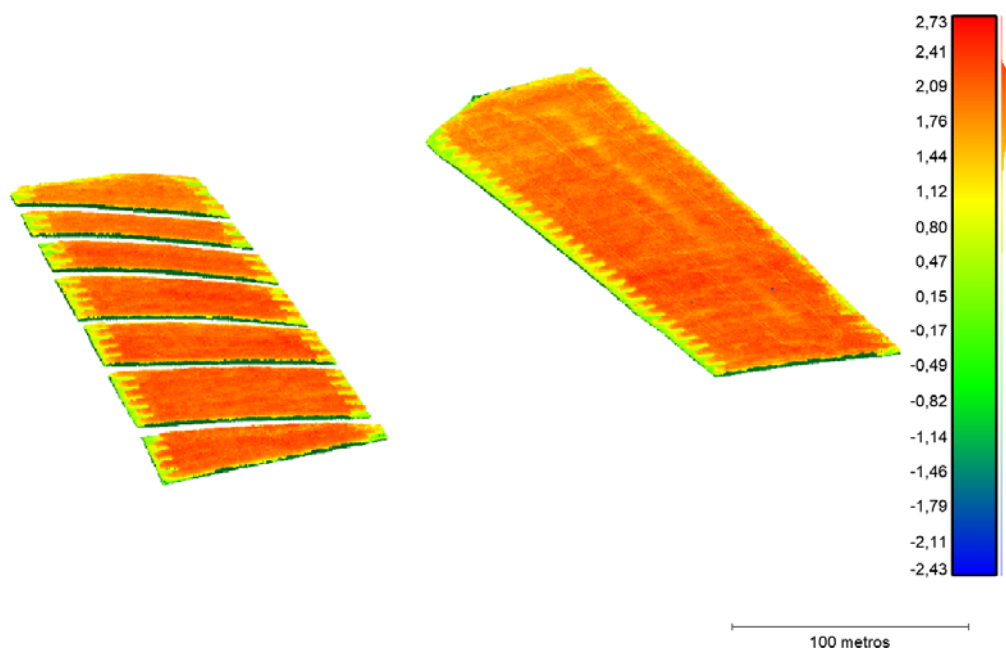
Figura 23 - Cálculo da distância nuvem/malha



Fonte: Adaptado de Lague, Brodu e Leroux, 2013.

Exemplifica-se na Figura 24 o resultado da aplicação da técnica “*Compute cloud/mesh distance*”, sem a filtragem para eliminação de outliers e diminuição de ruído, resultantes do processamento SfM-MVS para obtenção da nuvem de pontos.

Figura 24 - Exemplo de cálculo da distância nuvem/malha



Fonte: O autor.

Nota: A escala de cores apresentada, refere-se a uma verificação sem a necessária eliminação de *outliers* e a redução de ruído de processamento da nuvem de pontos, quando o objetivo é a elaboração de estatística descritiva. Porém, por meio da análise dos valores obtidos, verifica-se a predominância de pontos na cor laranja que representam o milho entre 1,76 e 2,09 metros de altura, no estádio reprodutivo da cultura.

Estes pontos podem ser eliminados baseando-se nas alturas das plantas verificadas em campo, na análise dos histogramas gerados e com base na altura

máxima esperada para o genótipo. Outro procedimento seria ajustar o modelo MDT, caso este venha a não apresentar a acurácia necessária, em relação a altitude. A aplicação das técnicas para eliminação de pontos desnecessários, bem como seus respectivos resultados serão apresentados nas próximas subseções.

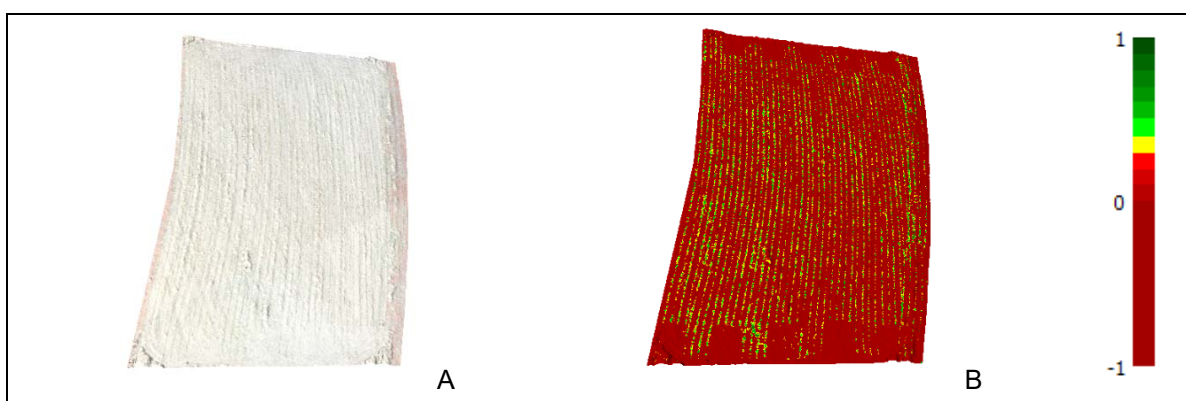
3.3.7 Filtragem dos dados

Objetivando-se eliminar dados desnecessários ou errados e pontos que não representam o objeto em estudo, utilizou-se de duas abordagens. A primeira refere-se a aplicação de um índice de vegetação nas nuvens de pontos, visando a separação solo/planta.

Na segunda, determinou-se a altura de corte mínima com base na análise dos histogramas de frequência inicialmente gerados com a técnica *Compute cloud/mesh distance* e a altura de corte máxima definindo-se o percentil de 99%. A altura mínima também pode ser definida com base no valor do percentil. Porém utilizou-se as alturas mínimas com base na análise dos histogramas inicialmente calculados.

Inicialmente aplicou-se um índice de vegetação, com o objetivo de separar os pontos que representam as linhas da cultura dos pontos que representam solo ou palhada. Verificou-se que o índice de vegetação, detectou as linhas de plantio no estádio V3, promovendo a separação solo/planta, conforme demonstrado na Figura 25.

Figura 25 – Exemplo de índice de Vegetação aplicado a nuvem de pontos

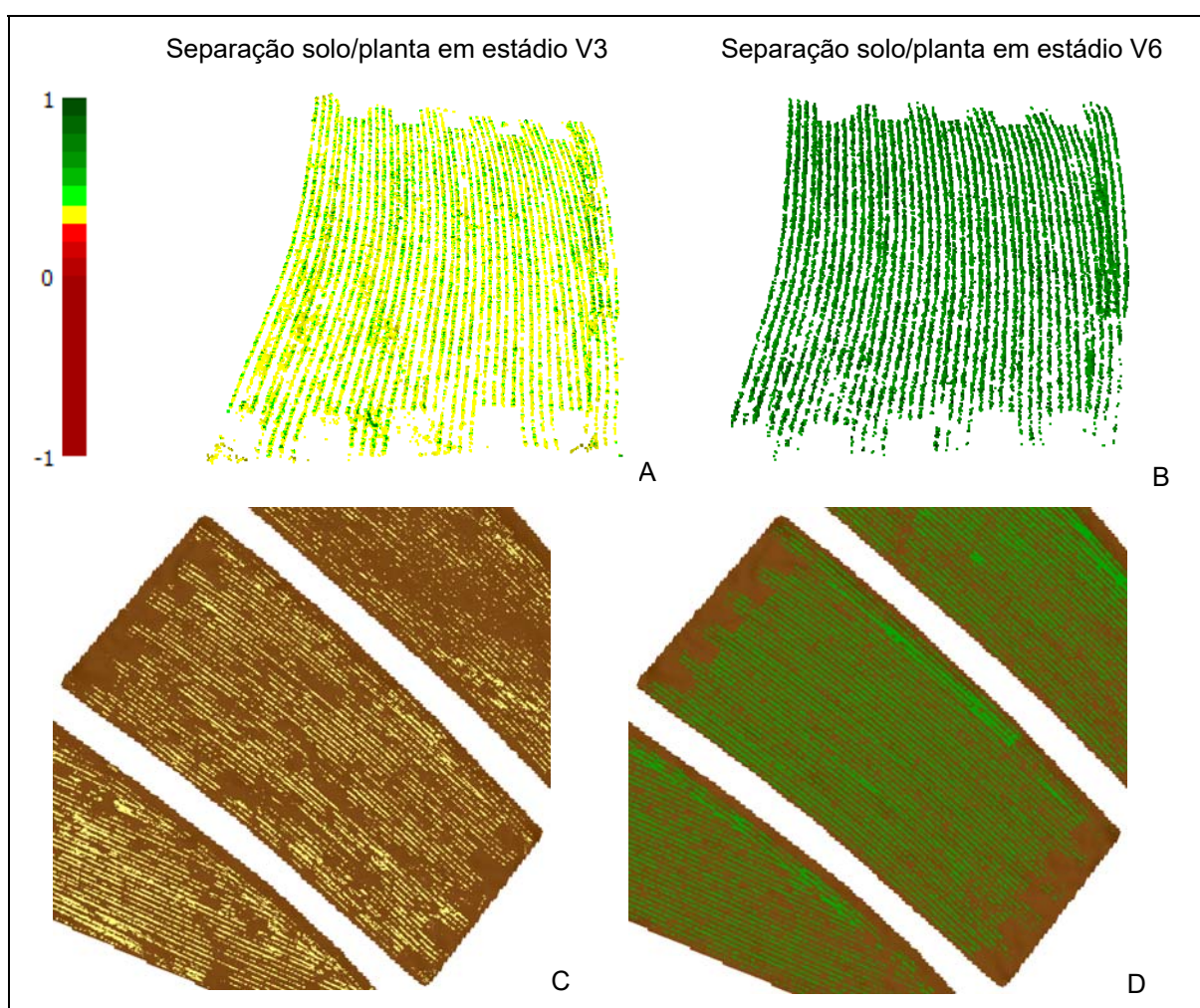


Fonte: O autor.

Nota: Aplicação da separação de pontos referentes a palhada e solo (ausência de atividade fotossintética) e plantas (atividade fotossintética). Constatou-se por meio de testes que, a separação é eficiente para os estádios iniciais da cultura, enquanto os espaços entrelinhas ainda não se encontram fechados e a densidade do estande ainda não é elevada. A Figura 25A representa a nuvem de pontos original resultante do processamento MVS e a Figura 25B o resultado da aplicação do índice de vegetação GLI.

Assim, exemplifica-se a separação de pontos referentes ao solo e a cultura via aplicação do índice de vegetação por meio da calculadora *raster* do programa Agisoft Metashape. Após a separação, pontos que não representam as plantas de milho (referentes a palhada e solo e que não apresentam atividade fotossintética) foram selecionados pela técnica de seleção de pontos por cores e excluídos. A Figura 26 exemplifica o resultado do processo de separação de pontos referentes as plantas de milho, realizado para as análises de crescimento dos estádios V3 e V6.

Figura 26 – Exemplo de separação solo/planta



Fonte: O autor.

Nota: Nuvens de pontos apresentando somente pontos referentes as plantas de milho. Verifica-se a menor atividade fotossintética das plantas no estágio V3 (Figura 26A e 26C), quando comparado ao estágio V6 (Figura 26B e 26D). Os índices podem variar entre 1 e -1. As linhas de plantio são representadas por pontos nas cores amarelas e verdes e a superfície do MDT de malha TIN pela cor marrom escura.

Neste exemplo, uma avaliação utilizando-se da escala de cores que varia entre 1 e -1, demonstra que o valor do índice de vegetação para a maioria dos pontos

classificados como de atividade fotossintética foi inferior no estádio V3 (184.993), quando comparado aos pontos com atividade fotossintética do estádio V6 (313.924).

Os processos de separação solo/planta para os estádios V10 e R1, não apresentaram resultados satisfatórios, pois as linhas do estande da cultura encontravam-se fechados. Nestes dois estádios supracitados não foi possível verificar ganho qualitativo quando da aplicação dos índices com o objetivo de separar os objetos sobre a superfície do solo, pois as entrelinhas da cultura não eram mais visíveis.

Assim, para o cálculo da altura por meio de nuvens de pontos sem a influência de outliers, determinou-se valores de percentis para definição da superfície do dossel. Segundo Grenzdörffer (2014), os percentis a 95% ou 99% são apropriados porque alturas relativas à plantas altas singulares que porventura tenham crescido mais em relação as outras, não determinam a altura média do dossel.

Como limite inferior, devido à proximidade com a superfície do solo, normalmente o percentil a 5% é apropriado.

Niu *et al.* (2019), verificaram alta correlação entre a altura verificada em campo e a altura derivada de uma nuvem de pontos definida a partir do valor percentil a 99%. Lu *et al.* (2021), encontraram como valor ótimo o percentil a 99,9%. Desta forma, conforme Tirado *et al.* (2020), para um experimento específico de monitoramento do milho, podem ser determinados valores ótimos de percentil estimando-se assim a altura do dossel.

O valor do percentil a 99% foi calculado no programa *CloudCompare* por meio da verificação do histograma. O valor aferido, pode ser confrontado com o percentil a 99% obtido a partir de um recorte da nuvem de pontos exportada para o formato texto em ambiente do programa *Excel*.

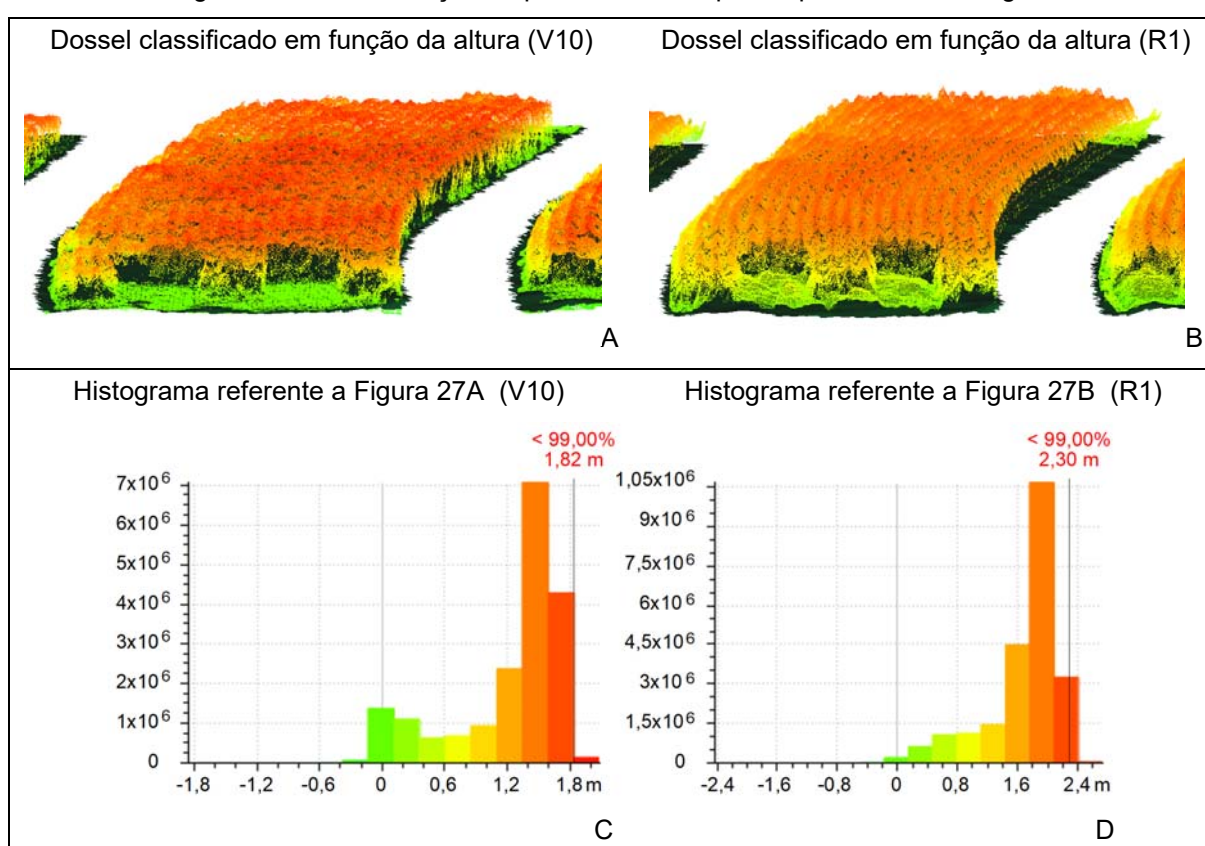
Assim, para a filtragem de dados analisou-se as nuvens de pontos referentes aos estádios de desenvolvimento V10 e R1 por meio da técnica *Compute cloud/mesh distance* do programa *CloudCompare*. Desta forma, determinou-se os pontos mínimos e máximos de corte, para realização do processo de filtragem que visa eliminar pontos referentes a ruído, outliers e de objetos sobre a superfície do solo, representados principalmente por ervas daninhas.

Observando-se em perspectiva a nuvem de pontos classificada em função da diferença das distâncias euclidianas do eixo Z, de uma mesma área definida pelos

eixos X e Y, verificou-se a separação em intervalos de classe que claramente delimitam pontos que representam o dossel da cultura.

Representa-se por meio das Figuras 27A e 27B que, pontos classificados em tons de laranja e vermelho representam a parte superior das plantas de milho e pontos em verde representam ervas daninhas sobre a superfície do solo. As Figuras 27C e 27D respectivamente exemplificam os histogramas gerados onde cada polígono de frequência assume a cor correspondente, conforme a separação em classes.

Figura 27 – Determinação de pontos de corte para o processo de filtragem



Fonte: O autor.

Nota: As Figuras 27A e 27B representam respectivamente a classificação das nuvens de pontos referentes aos estádios V10 e R1, em perspectiva. As Figuras 27C e 27D os respectivos gráficos de tendência de distribuição de frequência. Os polígonos de frequência gerados nos histogramas assumem uma cor que corresponde a uma determinada classe criada em função da diferença entre os pontos da nuvem (dossel da cultura) e o MDT (superfície do solo). Ruído, outliers e objetos sobre o solo na cena são identificáveis por meio da análise visual e correspondem as classes de menor frequência.

A Figura 27D corresponde a um segundo momento da cultura em relação a 27C onde a frequência de pontos referente as plantas (polígonos nas cores amarela, em tons de laranja e vermelho) aumenta e a frequência de pontos representadas por classes de ervas daninhas diminui (polígonos em tons de verde). Juntamente com o

aumento de frequência ocorre o aumento de altura de 0,6 a 1,8 metros (27C) para 0,8 a 2,4 metros (27D).

Com a análise dos histogramas, pode ser definida as alturas de corte inferiores e superiores para separação dos pontos que representam as plantas de milho, possibilitando-se o cálculo da altura média do dossel. Desta forma, determinou-se como pontos de corte inferiores as alturas de 0,6 m para o dossel em estádio V10 e 0,8 m para o estádio R1.

Como pontos de corte superiores adotou-se os valores de altura determinado com base no valor de 99% da quantidade total de dados (1,82 m para o estádio V10 e 2,30 m para o estádio R1).

3.3.8 Recálculo dos índices de vegetação e estatística descritiva

Após as análises realizadas nos recortes A e B (Figura 23), extraídos de cada nuvem de pontos, estes foram exportados para o formato texto e submetidos ao algoritmo de *Hausdorff* no programa *CloudCompare*. Assim, cada ponto com suas respectivas informações posicionais e RGB, passaram a possuir uma altura em relação ao MDT.

O Quadro 8 exemplifica um arquivo de saída, após o processamento no programa *CloudCompare*. Apresenta-se os 5 últimos pontos com as alturas calculadas, como exemplo.

Quadro 8 - Exemplo de um arquivo após o cálculo da altura

Ponto	Coordenada N	Coordenada E	Altitude	R	G	B	Altura
544295	7223997,64	596178,05	1024,51	161	192	120	2,30
544296	7224001,31	596173,35	1024,43	182	209	152	2,30
544297	7223991,37	596177,11	1024,86	149	188	124	2,30
544298	7224000,03	596172,04	1024,57	177	208	150	2,30
544299	7223996,96	596161,67	1025,11	168	199	130	2,30

Fonte: O autor.

Nota: Onde os valores de RGB encontram-se em Níveis digitais e a altura em metros.

A partir dos arquivos com as informações RGB e de altura dos pontos que representam as plantas, realizou-se o recálculo dos índices de vegetação para cada ponto das nuvens. Seguiu-se a tabulação dos dados, cálculo das estatísticas

descritivas, conforme exemplificado pelo Quadro 9, onde exemplifica-se os 5 últimos resultados calculados.

Quadro 9 - Exemplo de um arquivo após o cálculo dos índices de vegetação

Ponto	R	G	B	Altura	NGRDI	GLI	NGBI	RGBVI	VARI
544295	161	192	120	2,30	0,09	0,15	0,23	0,31	0,13
544296	182	209	152	2,30	0,07	0,11	0,16	0,22	0,11
544297	149	188	124	2,30	0,12	0,16	0,21	0,31	0,18
544298	177	208	150	2,30	0,08	0,12	0,16	0,24	0,13
544299	168	199	130	2,30	0,08	0,14	0,21	0,29	0,13

Fonte: O autor.

A normalidade dos conjuntos de dados calculados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov que analisa escores de uma amostra, em relação a escores de um modelo de distribuição normal com mesma média e distribuição teórica dos valores verificados nos dados. Em todos os casos o teste indicou a não normalidade a 5% de significância.

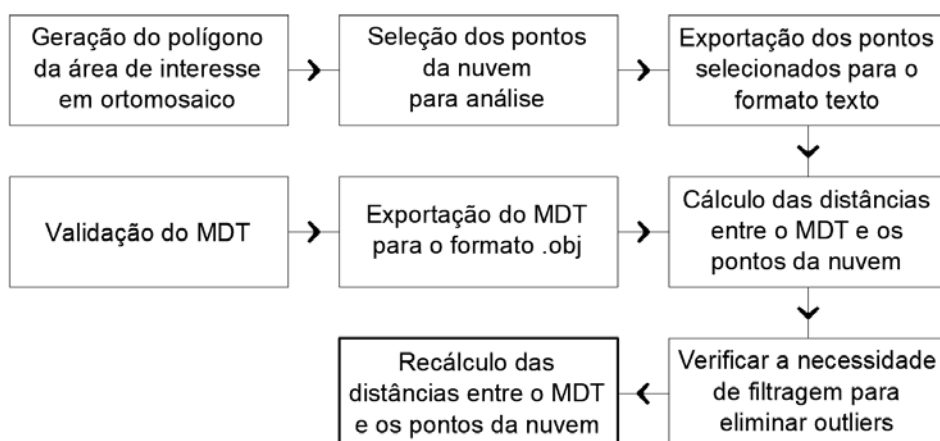
3.3.9 Descrição sumária da sistemática de realização dos experimentos

De forma a tornar a sistemática utilizada clara e objetiva, optou-se por apresentar sumariamente e com diagramas, as etapas de realização dos experimentos. Assim, representa-se respectivamente por meio de Quadros e Figuras as sistemáticas de: Verificação do crescimento por meio da frequência (Quadro 10 e Figura 28), Estimativa da altura média do dossel (Quadro 11 e Figura 29), Desenvolvimento em função dos índices de vegetação e altura (Quadro 12 e Figura 30) e Correlação entre crescimento e índices de vegetação (Quadro 13 e Figura 31).

Quadro 10 – Verificação do crescimento por meio da frequência

- Geração da poligonal das megaparcelas no programa *ArcMap* utilizando-se de ortomosaico
- Seleção dos pontos da nuvem por meio do polígono criado, após inserção no programa *Metashape*
- Exportação dos pontos selecionados para o formato texto
- Exportação do MDT para o formato *.obj*
- Cálculo da diferença entre a nuvem de pontos e o MDT no *CloudCompare*.
- Verificação da necessidade de eliminar outliers
- Análise dos histogramas de frequência.

Figura 28 – Diagrama: “Verificação do crescimento por meio da frequência”

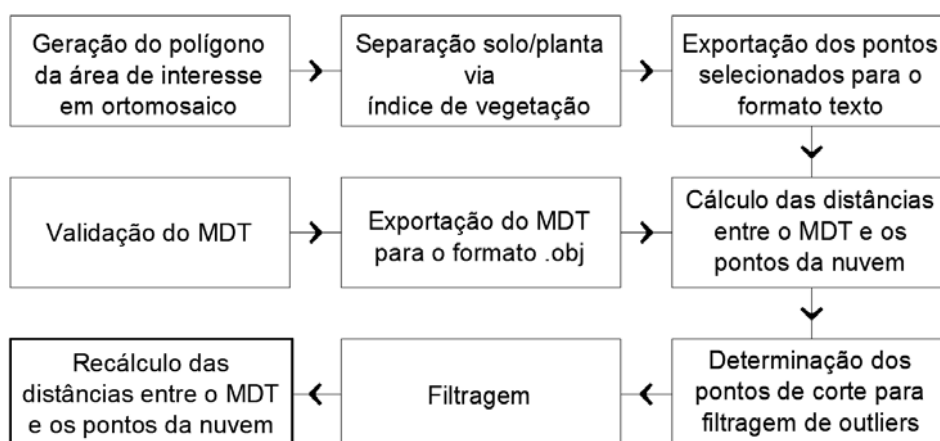


Fonte: O autor.

Quadro 11 - Sistemática para estimativa da altura média do dossel

- Geração da poligonal das megaparcelas no programa *ArcMap* utilizando-se de ortomosaico
- Separação solo/planta baseando-se em índice de vegetação
- Exportação dos pontos da cultura selecionados para o formato texto
- Exportação do MDT para o formato .obj
- Cálculo da diferença entre a nuvem de pontos e o MDT no *CloudCompare*.
- Análise dos histogramas de frequência (determinação dos pontos de corte).
- Filtragem da nuvem de pontos no *CloudCompare*.
- Cálculo da diferença entre a nuvem de pontos filtrada e o MDT no *CloudCompare*.
- Obtenção da altura média do dossel.

Figura 29 – Diagrama: “Estimativa da altura média do dossel”

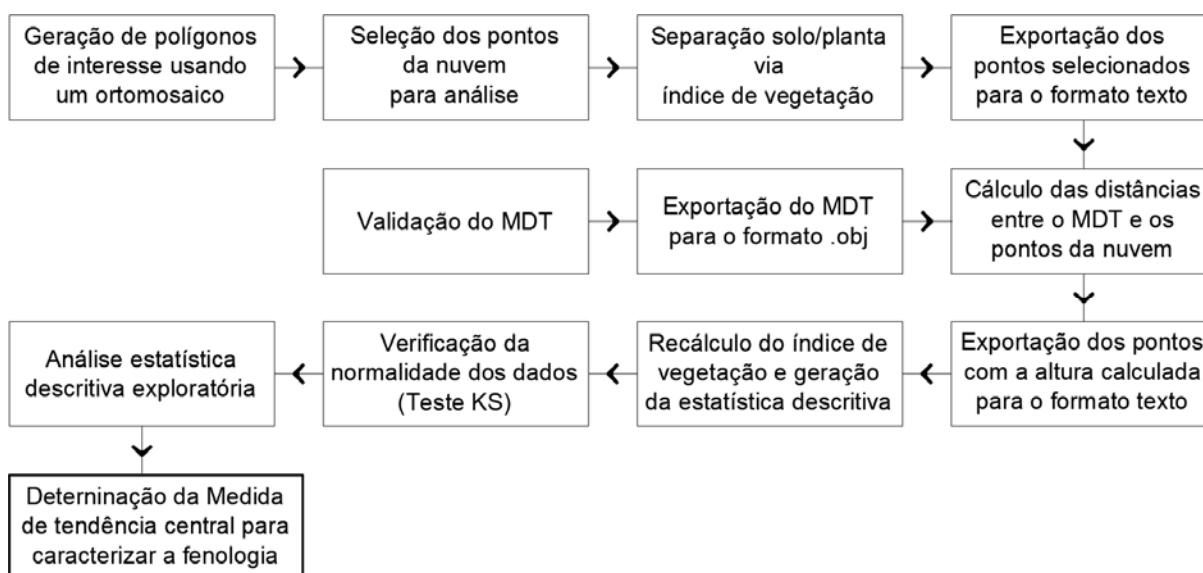


Fonte: O autor.

Quadro 12 - Desenvolvimento em função dos índices de vegetação

- Criação de polígonos por meio de ortomosaicos no programa *ArcMap*.
- Seleção dos pontos da nuvem por meio do polígono criado, após inserção no programa *Metashape*
- Separação solo/planta baseando-se em índice de vegetação
- Exportação dos pontos da cultura selecionados para o formato texto
- Cálculo da diferença entre a nuvem de pontos e o MDT no *CloudCompare*.
- Exportação dos pontos com a altura calculada para o formato texto
- Recálculo do (s) índice (s) de vegetação em planilha eletrônica (*Excel*).
- Verificação da normalidade dos dados.
- Análise estatística descritiva exploratória dos dados.
- Escolha da medida de tendência central para caracterizar o estágio de desenvolvimento do dossel.

Figura 30 – Diagrama: Desenvolvimento em função dos índices de vegetação”

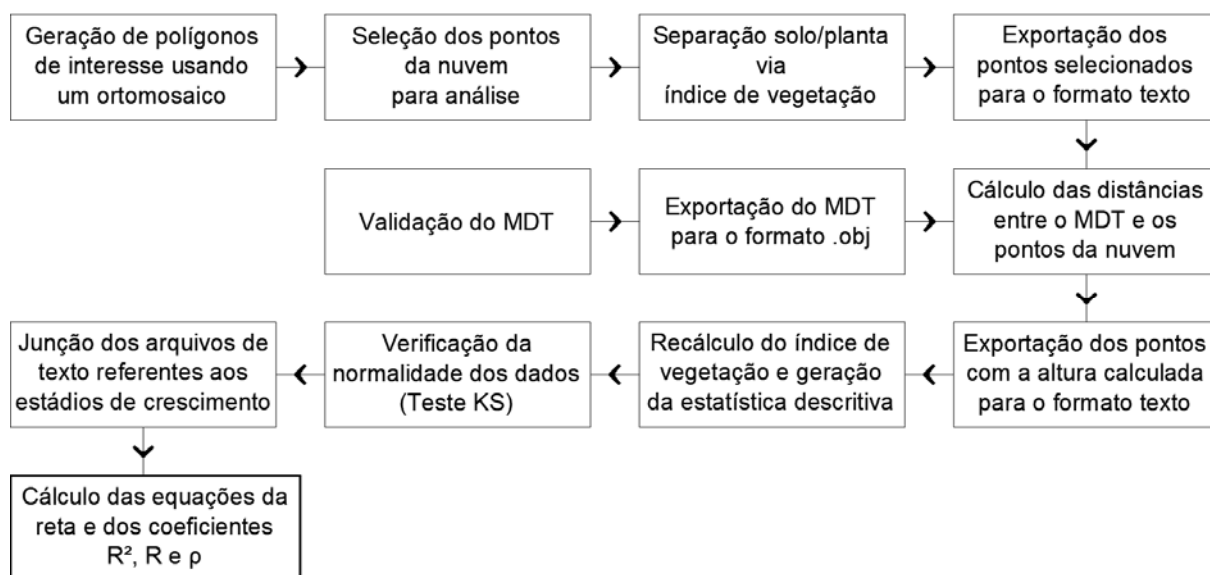


Fonte: O autor.

Quadro 13 - Correlação entre crescimento e índices de vegetação.

- Criação de polígonos por meio de ortomosaicos no programa *ArcMap*.
- Seleção dos pontos da nuvem por meio do polígono criado, após inserção no programa *Metashape*
- Separação solo/planta baseando-se em índice de vegetação
- Exportação dos pontos da cultura selecionados para o formato texto
- Cálculo da diferença entre a nuvem de pontos e o MDT no *CloudCompare*.
- Exportação dos pontos com a altura calculada para o formato texto
- Recálculo do (s) índice (s) de vegetação em planilha eletrônica (*Excel*).
- Verificação da normalidade dos dados.
- Junção dos arquivos em formato texto dos estádios V6 e V10 (Fases de crescimento).
- Cálculo das equações da reta e dos coeficientes R^2 , R e ρ .

Figura 31 – Diagrama: “Correlação entre crescimento e índices de vegetação”

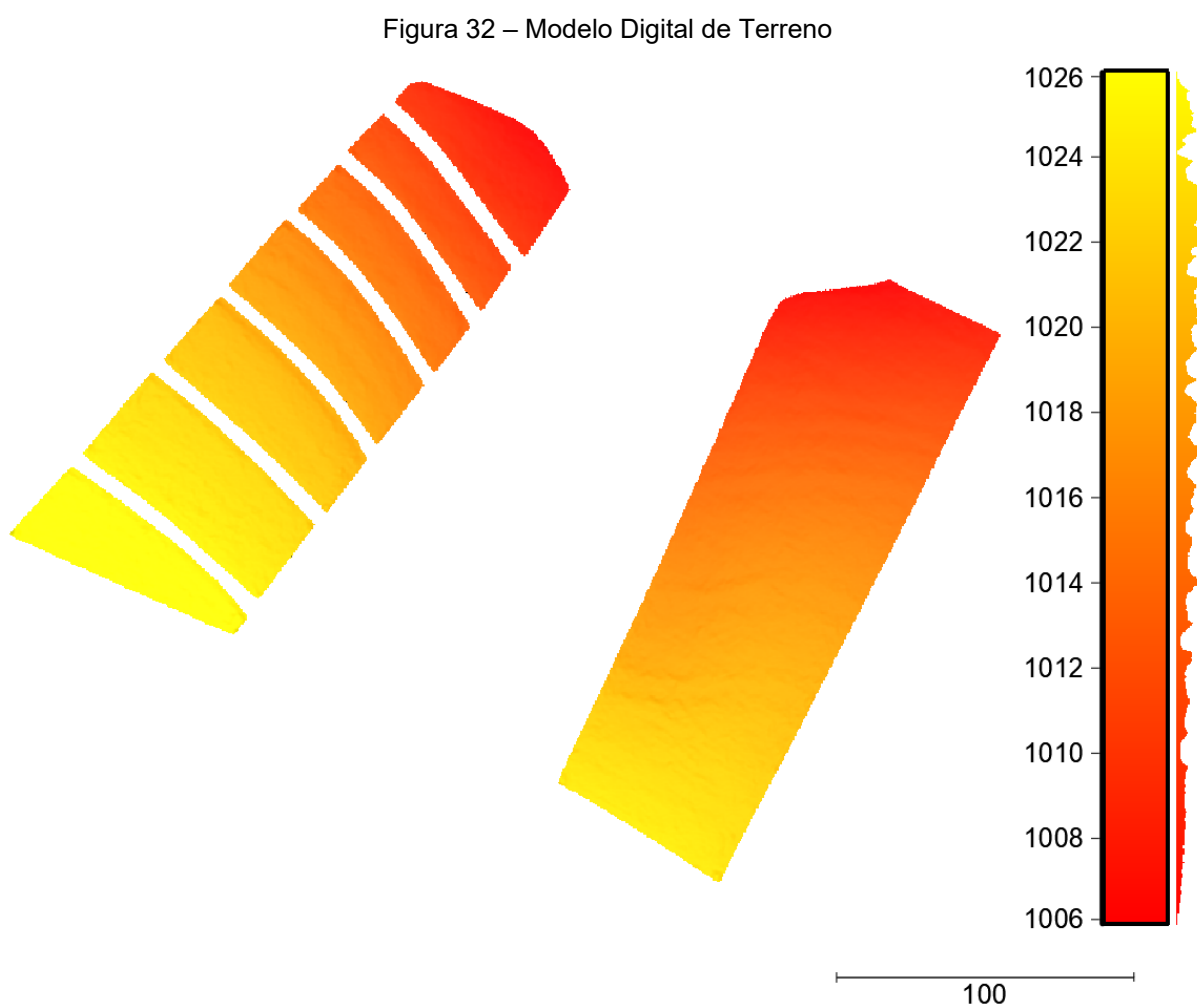


Fonte: O autor.

4 RESULTADOS

4.1 VALIDAÇÃO DO MDT

Após a criação do MDT, com a inclusão da megaparcela sem terraços, utilizou-se de uma planilha eletrônica para validação do referido modelo determinando-se o valor EP para enquadramento na tabela PEC-PCD. Demonstra-se pela Figura 32 o modelo ajustado e, na Tabela 2 as coordenadas levantadas em campo, bem como as coordenadas teste aferidas a partir dos ortomosaicos no programa *ArcMap*, para cálculo dos valores RMSE, conforme o decreto 89.817/84.



Fonte: O autor.

Nota: MDT criado no programa Agisoft Metashape e inserido no programa *CloudCompare* para estimar as alturas da cultura do milho, após avaliação da acurácia posicional apresentada na Tabela 2. A variação de cores representa a distribuição das altitudes no MDT. Tons de laranja mais escuros representam as partes mais baixas, tons de laranja mais claros as altitudes intermediárias e as cores amarelas, os pontos mais altos do terreno.

Tabela 2 - Cálculo da raiz do erro médio quadrático posicional em metros

Id	Coordenadas GNSS			Coordenadas Homólogas			Delta X	Delta Y	Delta Z	
Base	596386,483	7224064,685	1003,86	596386,469	7224064,687	1003,91	0,00	0,00	0,00	
58	596203,594	7223953,180	1023,13	596203,394	7223952,981	1023,30	0,04	0,04	0,03	
94	596197,984	7224012,587	1020,16	596198,018	7224012,658	1020,37	0,00	0,01	0,04	
67	596262,517	7224033,587	1013,76	596262,512	7224033,704	1013,86	0,00	0,01	0,01	
72	596316,555	7223888,295	1022,06	596316,287	7223888,394	1022,27	0,07	0,01	0,04	
42	596353,206	7223891,891	1020,93	596353,049	7223891,990	1021,12	0,02	0,01	0,04	
77	596349,562	7223920,045	1018,43	596349,589	7223920,201	1018,54	0,00	0,02	0,01	
48	596395,595	7223945,779	1016,54	596395,683	7223945,758	1016,76	0,01	0,00	0,05	
50	596393,214	7223974,044	1014,40	596393,036	7223974,345	1014,56	0,03	0,09	0,03	
51	596406,051	7223965,834	1014,92	596406,048	7223965,884	1015,07	0,00	0,00	0,02	
85	596388,983	7224002,862	1011,50	596388,872	7224003,126	1011,64	0,01	0,07	0,02	
55	596425,977	7224006,291	1010,84	596426,138	7224006,306	1011,02	0,03	0,00	0,03	
88	596393,271	7224040,242	1006,83	596393,218	7224040,377	1007,05	0,00	0,02	0,05	
92	596166,608	7224004,762	1021,99	596166,664	7224004,490	1021,87	0,00	0,07	0,02	
45	596362,916	7223912,142	1019,22	596362,880	7223912,154	1019,38	0,00	0,00	0,02	
46	596373,578	7223933,573	1017,59	596373,545	7223933,623	1017,70	0,00	0,00	0,01	
101	596243,152	7224062,370	1013,57	596243,036	7224062,402	1013,80	0,01	0,00	0,05	
98	596227,857	7224046,628	1015,71	596227,911	7224046,579	1016,09	0,00	0,00	0,15	
91	596171,052	7223977,171	1023,36	596170,655	7223977,317	1023,66	0,16	0,02	0,09	
83	596355,624	7223969,466	1014,52	596355,453	7223969,803	1014,65	0,03	0,11	0,02	
							RMSE xyz	0,15	0,16	0,20
							RMSEr (m)	0,22	1:1.300	Classe A

Fonte: O autor.

Nota: Cálculos realizados conforme o decreto 89.817/84 e normas da DSG (2016). Informações sobre outras validações e o processamento de dados GNSS, podem ser encontradas nos Apêndices A e B.

A partir dos resultados dos cálculos e pela consulta as normas brasileiras, conforme o decreto 89.817/84, classificou-se o produto cartográfico. A lei estabelece que 90% dos pontos bem definidos, quando testados no terreno em relação a sua planimetria ou isoladamente em relação a sua altimetria, não deverão apresentar valores RMSE superiores aos valores PEC estabelecidos (Quadros 4 e 5). Desta forma, o MDT é acurado para a escala 1:1000 com classificação “B” no PEC-PCD, pois o valor do RMSE encontra-se entre os valores de referência EP planimétricos de 0,17 e 0,30 m e entre os valores de referência EP altimétricos de 0,17 e 0,33 m.

4.2 VERIFICAÇÃO DO CRESCIMENTO PELA FREQUÊNCIA

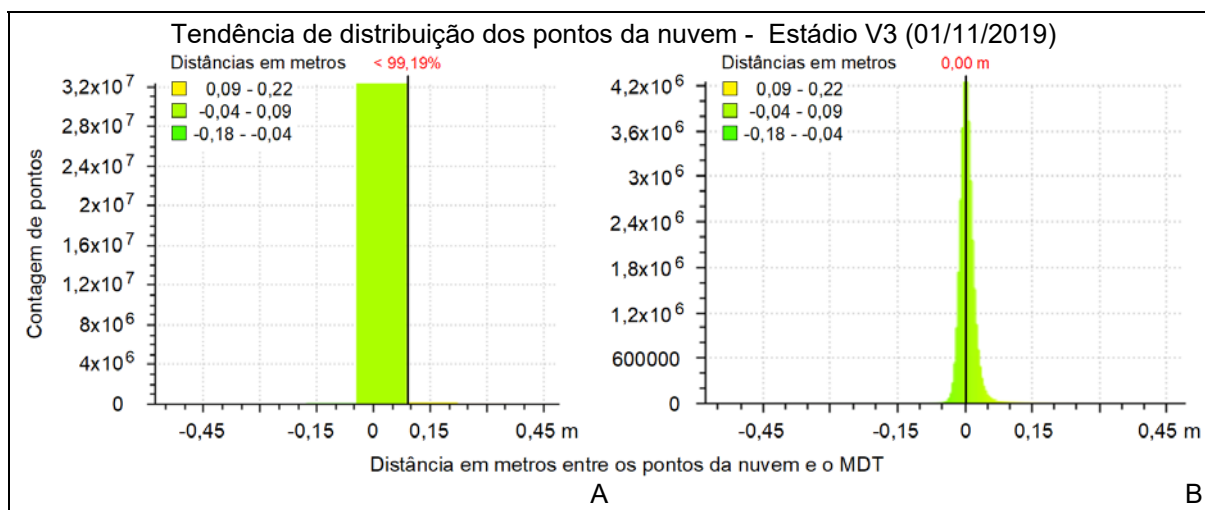
Utilizando-se da técnica *Compute cloud/mesh distance*, as nuvens de pontos obtidas pelo processamento das fotos, dos voos realizados a 100 metros de altura da

megaparcela com terraços foram analisadas. Computou-se desta forma neste experimento inicial, as diferentes distâncias entre os pontos das nuvens que representam as plantas de milho e o MDT que representa o solo, possibilitando-se desta forma estimar aproximadamente seu estágio de desenvolvimento em função das alturas dos objetos (plantas de milho) na superfície.

A técnica que utiliza o algoritmo de *Hausdorff*, calcula as distâncias euclidianas no eixo Z, gerando histogramas que apresentam no eixo Y a contagem de pontos e no X as alturas dos pontos.

Assim, pode-se verificar quantitativamente o crescimento das plantas, a partir da análise de dados de frequência e altura dos pontos da nuvem do dossel. Nas Figuras 33, 34, 35 e 36 exibe-se os resultados das análises em forma gráfica, dos cálculos das distâncias euclidianas em metros, entre o modelo de referência MDT e as nuvens de pontos obtidas com o processamento das imagens RPA a 100 metros de altura. Para cada estágio analisado, tem-se um gráfico característico com diferentes tendências de distribuição, demonstrando-se assim a crescimento do objeto de estudo.

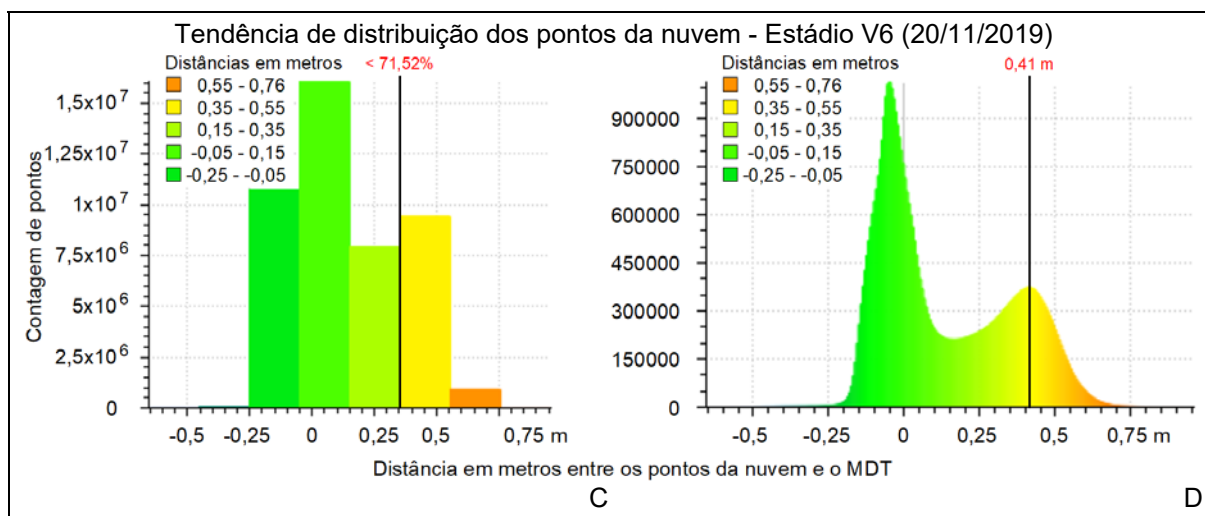
Figura 33 - Estimativa de estágio fenológico inicial



Fonte: O autor.

Nota: Apresenta-se por meio da Figura 33 a estimativa do estágio fenológico pela frequência de pontos de uma cultura em estágio inicial de desenvolvimento onde o eixo y representa a contagem de pontos e o eixo x a altura dos pontos em relação ao solo. O gráfico A demonstra a formação de classes que não representam as plantas de milho (99,19% dos pontos computados são menores que 0,10 m). Assim, a quantidade de pontos referentes ao solo ou palhada é elevada. O gráfico B apresenta a altura de maior frequência que é igual a 0. Legenda inserida pelo autor.

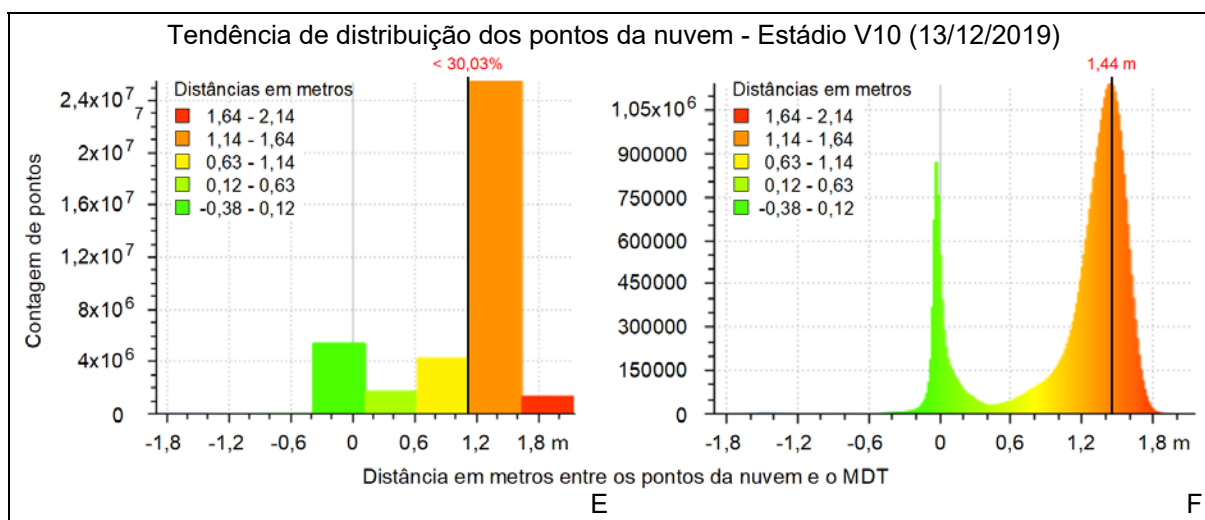
Figura 34 - Estimativa de estágio fenológico vegetativo posterior a V5



Fonte: O autor.

Nota: Apresenta-se por meio da Figura 34 a estimativa do estágio fenológico pela frequência de pontos de uma cultura em estágio intermediário de desenvolvimento (posterior a V5). O eixo y representa a contagem de pontos e o eixo x a altura dos pontos em relação ao solo. O gráfico C demonstra a formação de classes que não representam a altura do dossel (71,52% dos pontos computados são menores que 0,30 m). O gráfico D apresenta o valor de altura de maior frequência no dossel que é igual a 0,41 m. Legenda inserida pelo autor.

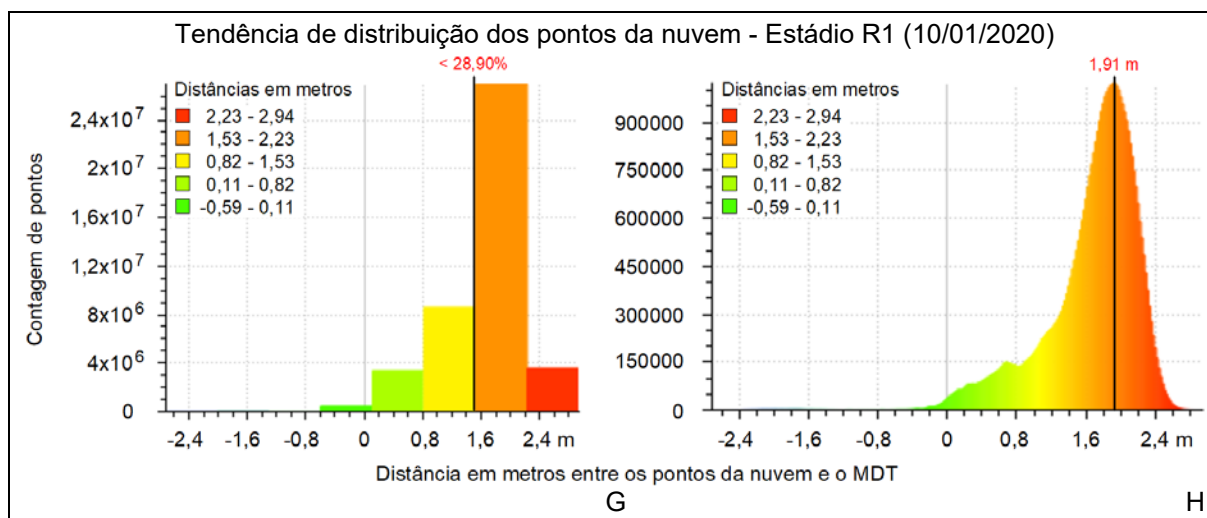
Figura 35 - Estimativa de estágio fenológico vegetativo



Fonte: O autor.

Nota: Na Figura 35 o eixo y demonstra o aumento da quantidade de pontos que representam o dossel e eixo x o aumento da altura estimada das plantas de milho. Comparando-se com os valores apresentados nos gráficos C e D que representam o estágio fenológico de desenvolvimento anterior analisado (V6), verifica-se uma diminuição significativa de pontos que não representam o dossel para 30,03% (gráfico E) e o aumento da altura dos pontos de maior frequência para 1,44 m (gráfico F). Legenda inserida pelo autor.

Figura 36 - Estimativa de estágio fenológico reprodutivo



Fonte: O autor.

Nota: Verifica-se na Figura 36 o dossel vegetativo em estágio R1. O eixo y do gráfico G não registra aumento da quantidade de pontos em relação ao gráfico E referente ao estágio de desenvolvimento anterior (V10) e o eixo x demonstra que a altura máxima esperada para este genótipo foi alcançada (2,4 m), indicando que a cultura está em estágio reprodutivo. Por meio do gráfico H verifica-se que o valor de altura mais frequente para as plantas de milho é 1,91 m. Legenda inserida pelo autor.

Todas as nuvens analisadas referem-se exatamente a mesma área de cultivo em quatro momentos diferentes. Nos gráficos D e F demonstra-se um estágio de desenvolvimento posterior ao V5 no qual a planta adquire estatura passível de ser estimada e a quantidade de pontos referentes ao solo é intermediária. O gráfico H representa um estágio reprodutivo do milho. Gera-se então um gráfico com poucos pontos referentes ao solo e com o ponto de maior frequência próximo a altura máxima esperada para o genótipo.

Representa-se por meio dos histogramas a frequência das alturas dos diferentes objetos da cena, em intervalos de classe. Desta forma, ele pode ser usado para monitorar o desenvolvimento do dossel da cultura a partir do ganho de estatura das plantas. Levando-se em consideração os resultados dos processamentos, representa-se por meio dos gráficos A, C, E e G, o desenvolvimento das plantas ao longo do ciclo fenológico.

Baseando-se no computo dos dados de altura, verifica-se o aumento gradual da porcentagem de pontos que representam o dossel (respectivamente: 0,81%, 28,48%, 69,97% e 71,10%). A análise dos histogramas B, D, F, e H também permite esta constatação, a partir da diminuição da frequência de pontos de menor altura, referentes ao solo, palhada ou ervas daninhas.

Observando-se os gráficos A e B gerados com a nuvem de pontos referente ao primeiro dia de levantamento (01/11/2019), verifica-se o estágio fenológico de pós-emergência V3, onde as plantas apresentarão baixa estatura, pois o sistema radicular ainda está se desenvolvendo mais do que a parte aérea da planta. O ponto de crescimento permanecerá abaixo da superfície do solo até o estágio V6.

A Figura 37, apresenta as plantas de milho no primeiro dia de levantamento. Na referida data de 01/11/2019, o solo apresentava palhada, resultante da rolagem da aveia preta por meio de rolo mecânico articulado.

Figura 37 - Milho em estágio de desenvolvimento fenológico V3



Fonte: O autor.

Nota: Foto das linhas de plantio de milho na data de 01/11/2019, demonstrando a baixa estatura das plantas no estágio V3, com aproximadamente 20 cm.

Nos gráficos C e D, demonstra-se o histograma obtido a partir da nuvem de pontos referente a data de 20/11/2019, em que a lavoura se encontrava em estágio V6. Este é um momento importante para estimar a altura do milho porque a partir desta etapa o crescimento da planta passa a ocorrer predominantemente em sua parte aérea com o alongamento do caule. Demonstra-se o estágio de desenvolvimento V6 na Figura 38.

Figura 38 - Milho em estágio de desenvolvimento fenológico V6



Fonte: O autor.

O crescimento da planta ocorre até o estágio de desenvolvimento R1, representado pelos histogramas G e H. Nesta fase inicia-se o processo de polinização e cessam as elongações dos colmos. Desta forma a planta para de adquirir estatura. Demonstra-se respectivamente a visão geral da cultura no estágio de desenvolvimento R1 por meio das Figuras 39.

Figura 39 - Milho em estágio de desenvolvimento fenológico R1



Fonte: O autor.

Os valores negativos nos histogramas referem-se a imprecisão do modelo MDT e/ou devido a influência da palhada. Outra causa refere-se a pontos desnecessários chamados de ruído ou aberrações nos dados chamados *outliers* que são gerados no processo de detecção incorreta de pontos homólogos nas fotos conforme apontado por Triggs *et al.*, (2000) e Olsson, Eriksson e Hartley (2010). Jensen e Mathews (2016) relatam que mesmo depois da remoção de *outliers* da nuvem de pontos, valores anômalos altos e baixos da coordenada Z persistiram no conjunto de dados.

Apesar dos gráficos indicarem quando a cultura se encontrava em um estágio inicial (V3), de desenvolvimento da parte aérea da planta (V6 e V10) e reprodutivo (R1), além de fornecerem uma estimativa da altura do dossel, para que seja computada uma altura média da cultura, valores referentes a *outliers* e ruído dos experimentos ou valores que claramente não representam as plantas de milho, devem ser descartados ou minimizados, conforme mencionado na metodologia.

4.3 ESTIMATIVA DA ALTURA MÉDIA DO DOSSEL

Com base no cálculo das distâncias utilizando-se do modelo MDT ajustado e dos recortes das nuvens de pontos referente a megaparcela com terraços e sem terraços (pontos selecionados e exportados, conforme demonstrado na subseção 3.3.3), computou-se novamente as alturas da lavoura de milho em cada data analisada.

Verificou-se que o recálculo para aferição da altura média do dossel a partir do modelo MDT ajustado também apresentou grande quantidade de valores negativos (pontos que estariam posicionados abaixo do MDT que representa a superfície do solo).

Após a exclusão dos pontos que claramente não representam a cultura, por meio do processo de separação solo/planta e de filtragem realizado com base nas alturas de corte (conforme demonstrado na subseção 3.3.6), estimou-se as alturas médias do dossel. A técnica *Compute cloud/mesh distance* do software *CloudCompare* é novamente aplicada aos recortes realizados, conforme exemplificado na Figura 26.

Assim, tabulando-se os valores estimados para a altura do dossel a partir dos trabalhos de campo e das nuvens de pontos resultantes dos processamentos fotogramétricos para cada estágio fenológico analisado, tem-se na Tabela 3 as

estimativas das alturas médias medidas manualmente e as estimativas de crescimento em altura do dossel medidas computacionalmente, para os estádios V3, V6, V10 e R1.

Tabela 3 - Alturas estimadas do dossel da cultura medidas manualmente e computacionalmente

Estádio	Medido Manualmente			CloudCompare		
	Altura mín/máx	Altura média	Sigma (σ)	Altura máx	Altura média	Sigma (σ)
V3	0,00 - 0,15	0,12	0,015	-	-	-
V6	0,40 - 0,70	0,53	0,100	0,62	0,37	0,13
V10	-	-	-	1,83	1,45	0,23
R1	1,10 - 2,20	1,94	0,14	2,30	1,83	0,29

Tabela 3: Variação da altura do dossel conforme o ciclo fenológico. Para os estádios V3, V6, V10 e R1, realizaram-se voos a 100 metros de altura. Não foram coletadas amostras das alturas das plantas no estádio V10. Realizaram-se aplicações de filtragem nas nuvens utilizando-se de valores mínimos e máximos, antes da determinação das alturas médias do dossel. Optou-se por apresentar os valores de estimativa da análise conjunta das megaparcels, pois as médias calculadas individualmente, oscilavam em 1 cm para mais ou para menos do valor da média (valores na tabela calculados em metros).

Salienta-se que, para estimar a altura média do dossel no estádio V6 utilizou-se da nuvem de pontos que apresentava somente pontos referentes as plantas de milho, obtidas por meio do índice de vegetação GLI. Não foi possível detectar as plantas em função da altura para o estádio inicial V3.

Caso o processo de filtragem não seja executado os resultados de estatística descritiva das alturas estimadas do dossel, seriam computadas juntamente com as alturas de outros objetos que porventura existissem sobre a superfície do terreno, elevando o erro.

A partir da estatística descritiva apresentada na Tabela 3 das alturas estimadas do dossel da cultura medidas manualmente e computacionalmente, calculou-se o coeficiente de variação para análise da dispersão em termos relativos dos cálculos das alturas médias.

Para as medidas realizadas com trena métrica manual, obtiveram-se os valores dos coeficientes de variação, respectivamente para os estádios V3, V6 e R1 de 12,50%, 18,86% e 18,37% e para as medidas estimadas em ambiente computacional, os valores dos coeficientes de variação, para os estádios V6, V10 e R1, respectivamente os valores 35,13%, 10,66%, 7,77%.

Segundo Cargnelutti Filho, Lúcio e Lopes (2009), o coeficiente de variação indica o erro experimental, que pode ser classificado em: baixo (menor que 10%), médio (entre 10 e 20%), alto (entre 20 e 30%) e muito alto (superior a 30%).

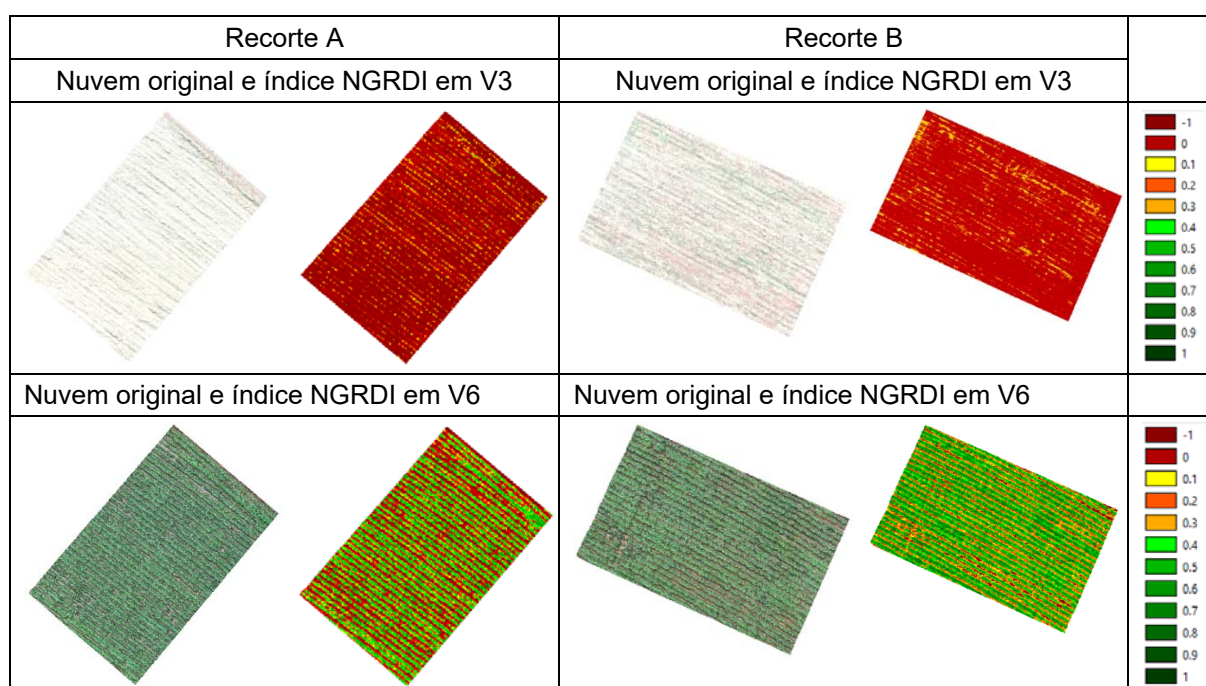
Apesar do coeficiente de variação calculado para o estádio V6 ser classificado como muito alto, Gurgel, Ferreira e Soares (2013), apud Steel *et al.* (1997), apontam que, saber se um determinado valor é excessivamente alto ou baixo para um determinado experimento, requer experiência com a cultura e com dados similares.

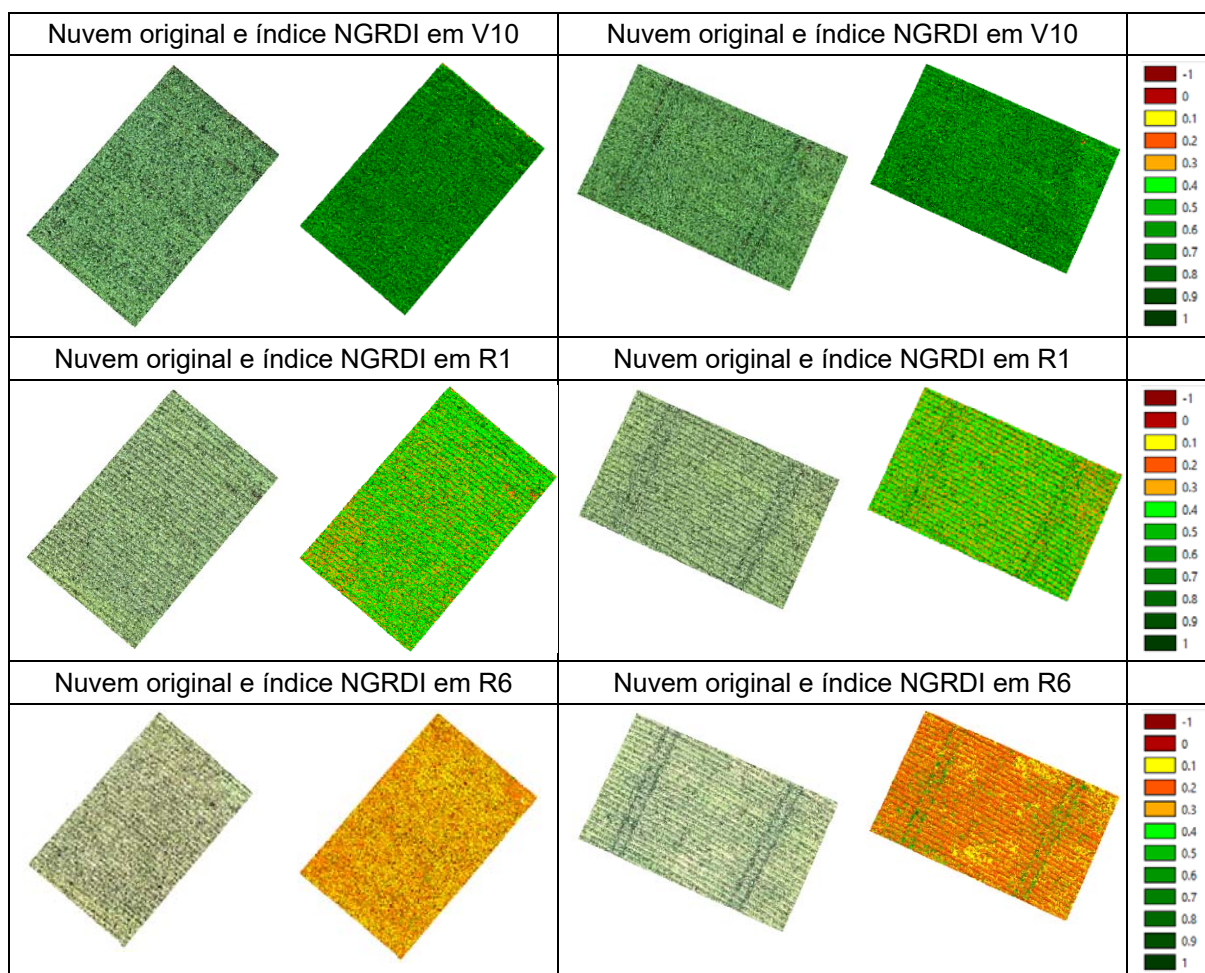
4.4 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO COMO INDICADOR DE DESENVOLVIMENTO

Obtiveram-se os índices de vegetação a partir de dois recortes (A e B da Figura 21) extraídos de cada nuvem de pontos obtida pelo processamento das imagens tomadas pela RPA em cada data de voo realizado a 100 m de altura.

A Figura 40 demonstra os resultados para cada estádio fenológico analisado, obtidos a partir da fórmula do índice NGRDI. Utilizando-se da calculadora *raster* do programa Agisoft Metashape aplicou-se as fórmulas dos índices de vegetação aos dados. Com este procedimento, ocorre a separação em classes representadas por cores. Desta forma, classificou-se os pontos das nuvens com base nas informações espectrais dos comprimento de onda do visível.

Figura 40 - Verificação do desenvolvimento da cultura





Fonte: O autor.

Nota: As escalas de cores referem-se ao índice de vegetação NGRDI. Recortes das imagens originais possuem suas respectivas informações espectrais RGB, conforme o sensor utilizado.

Conforme a paleta de cores utilizada para rotulagem, tons em vermelho indicam valores igual a 0 ou negativos em relação a atividade fotossintética (solo ou palhada), cores amarela e tons em laranja, indicam baixa atividade fotossintética e tons de verde indicam atividade fotossintética igual ou superior a 0,4 (quanto mais escuros, maior o vigor vegetativo).



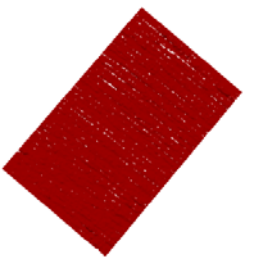


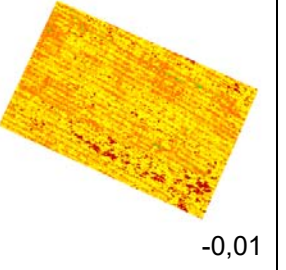
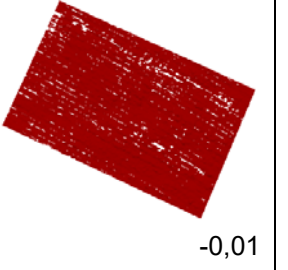
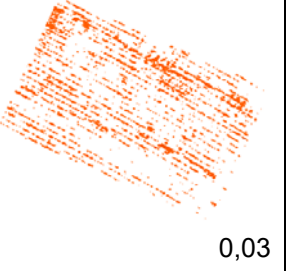
Verifica-se nas amostras de pontos das séries temporais classificadas que a atividade fotossintética aumenta até o estágio V10 e, passa a diminuir a partir do estágio R1.

Com a classificação das nuvens por meio de índices de vegetação no programa *Agisoft Metashape* possibilita-se que, somente pontos referentes ao objeto de estudo sejam selecionados, atenuando ao máximo o “efeito de fundo” causado pelos níveis digitais que representam solo e/ou palhada nos estádios em que a lavoura de milho se encontra com as entrelinhas visíveis.

Assim, pontos que claramente representavam solo e/ou palhada nas nuvens de pontos que exprimem os estádios V3 e V6 foram selecionados por meio da técnica “Seleção de pontos por cores” e deletados. Desta forma, para o cálculo dos índices médios de vegetação dos recortes A e B desconsiderou-se valores relativos inferiores a 0,1 para o estágio V3 e inferiores a 0,3 para o estágio V6, pois não representavam a cultura.

A Figura 41, mostra os resultados do procedimento para o estágio V3 usando-se o índice NGRDI, verificando-se assim o desenvolvimento da cultura que, dependendo da precisão da modelagem computacional, não pode ser verificada por meio de sua estatura.

Figura 41 - Desenvolvimento da cultura em estágio fenológico V3

Recortes	Classificação NGRDI	Superfície do solo	Linhas de cultivo
 A	 0,00 362.376 pontos B	 0,00 345.105 pontos C	 0,02 17.271 pontos D
 E	 -0,01 358.327 pontos F	 -0,01 325.547 pontos G	 0,03 32.780 pontos H

Fonte: O autor.

Nota: Os valores apresentados no canto inferior direito, representam o índice médio de vegetação NGRDI e a quantidade de pontos utilizada para realizar o cálculo (cada ponto possui um valor RGB). Para obtenção das nuvens 39D e 39H foram excluídos os pontos classificados com um índice NGRDI relativo de -1 e 0.

Buscou-se com o procedimento de separação a obtenção de índices médios de vegetação utilizando-se somente de pontos que representam as plantas. Para os estádios V10, R1 e R6, o processo não foi executado devido a densidade do dossel e as entrelinhas estarem fechadas.

Conforme o índice de vegetação utilizado, o procedimento resultou na separação de diferentes quantidades de pontos que representam a lavoura. Estes então foram exportados para o formato texto para manipulação dos dados por meio de planilha eletrônica onde, a mesma fórmula empregada para separação do objeto de estudo no programa *Agisoft Metashape*, é utilizada para recálculo dos índices e posterior computo de suas respectivas estatísticas descritivas.

Na Tabela 4 apresenta-se os valores médios dos cinco índices de vegetação analisados neste trabalho, ao longo da série temporal, referentes aos recortes realizados nas nuvens de pontos. Porém, o procedimento de separação do objeto de estudo para cálculo da estatística descritiva foi aplicado somente para os estádios V3 e V6, pois as linhas de plantio ainda se encontravam visíveis, o que possibilitava a separação solo planta.

Tabela 4 - Índices médios de vegetação obtidos pela estatística descritiva

(continua)

	Recorte A				Recorte B			
NGRDI	Média	Mediana	Sigma (σ)*	Pontos	Média	Mediana	Sigma (σ)*	Pontos
V3	0,02	0,02	0,01	16.994	0,03	0,03	0,01	32.128
V6	0,14	0,13	0,09	470.775	0,14	0,13	0,07	369.581
V10	0,24	0,23	0,09	420.578	0,28	0,26	0,10	426.759
R1	0,11	0,10	0,04	544.299	0,11	0,10	0,05	546.943
R6	0,02	0,01	0,03	552.514	0,06	0,05	0,04	539.705
GLI	Média	Mediana	Sigma (σ)	Pontos	Média	Mediana	Sigma (σ)	Pontos
V3	0,04	0,03	0,01	5.965	0,04	0,04	0,01	17.330
V6	0,16	0,15	0,07	360.229	0,16	0,15	0,07	355.055
V10	0,25	0,24	0,09	420.578	0,31	0,30	0,11	426.759
R1	0,15	0,14	0,05	544.299	0,15	0,14	0,06	546.943
R6	0,09	0,08	0,05	552.514	0,10	0,10	0,04	539.705
NGBI	Média	Mediana	Sigma (σ)	Pontos	Média	Mediana	Sigma (σ)	Pontos
V3	0,05	0,04	0,00	6.271	0,05	0,05	0,01	13.987
V6	0,18	0,16	0,06	247.355	0,18	0,16	0,07	343.338
V10	0,27	0,26	0,10	420.578	0,34	0,33	0,12	426.759
R1	0,20	0,19	0,07	544.299	0,21	0,20	0,07	546.943
R6	0,17	0,16	0,09	552.514	0,15	0,15	0,05	539.705

Tabela 4 - Índices médios de vegetação obtidos pela estatística descritiva

(conclusão)

VARI	Recorte A				Recorte B			
	Média	Mediana	Sigma (σ)	Pontos	Média	Mediana	Sigma (σ)	Pontos
V3	0,06	0,06	0,02	6.090	0,07	0,07	0,03	17.322
V6	0,25	0,25	0,15	470.188	0,23	0,22	0,12	365.842
V10	0,36	0,35	0,13	420.578	0,40	0,39	0,11	426.759
R1	0,17	0,16	0,07	544.299	0,16	0,15	0,07	546.943
R6	0,02	0,02	0,05	552.514	0,10	0,09	0,06	539.705
RGBVI	Média	Mediana	Sigma (σ)	Pontos	Média	Mediana	Sigma (σ)	Pontos
V3	0,07	0,07	0,01	6.172	0,08	0,08	0,02	17.552
V6	0,30	0,28	0,13	380.715	0,29	0,28	0,12	374.683
V10	0,47	0,46	0,14	420.578	0,55	0,55	0,15	426.759
R1	0,30	0,29	0,09	544.299	0,30	0,29	0,10	546.943
R6	0,18	0,17	0,10	552.514	0,21	0,20	0,08	539.705

Fonte: O autor.

Tabela 04: Os valores médios dos índices de vegetação refletem o desenvolvimento do dossel por meio da atividade da clorofila das plantas. Quanto maior o valor, maior a atividade fotossintética. Apesar dos maiores índices médios serem encontrados no estágio V10, o pico da fotossíntese no milho ocorre no florescimento. Neste estágio de desenvolvimento da cultura nenhum voo foi realizado com a RPA.

*O valor Sigma (σ) refere-se ao desvio padrão.

Aplicando-se o teste KS aos dados das nuvens de pontos utilizadas para geração dos índices médios de vegetação, encontrou-se em todos os casos um *p-value* inferior a 0,005, verificando-se a não normalidade.

Entretanto, considerou-se que as médias calculadas representam a tendência central porque diferem em no máximo 0,02 dos valores calculados para as medianas. O valor da mediana pode ser utilizada como medida de tendência central e caracterizar um valor típico do conjunto de dados, pois estatisticamente não é afetada por valores extremos e *outliers* (MEDRI, 2011).

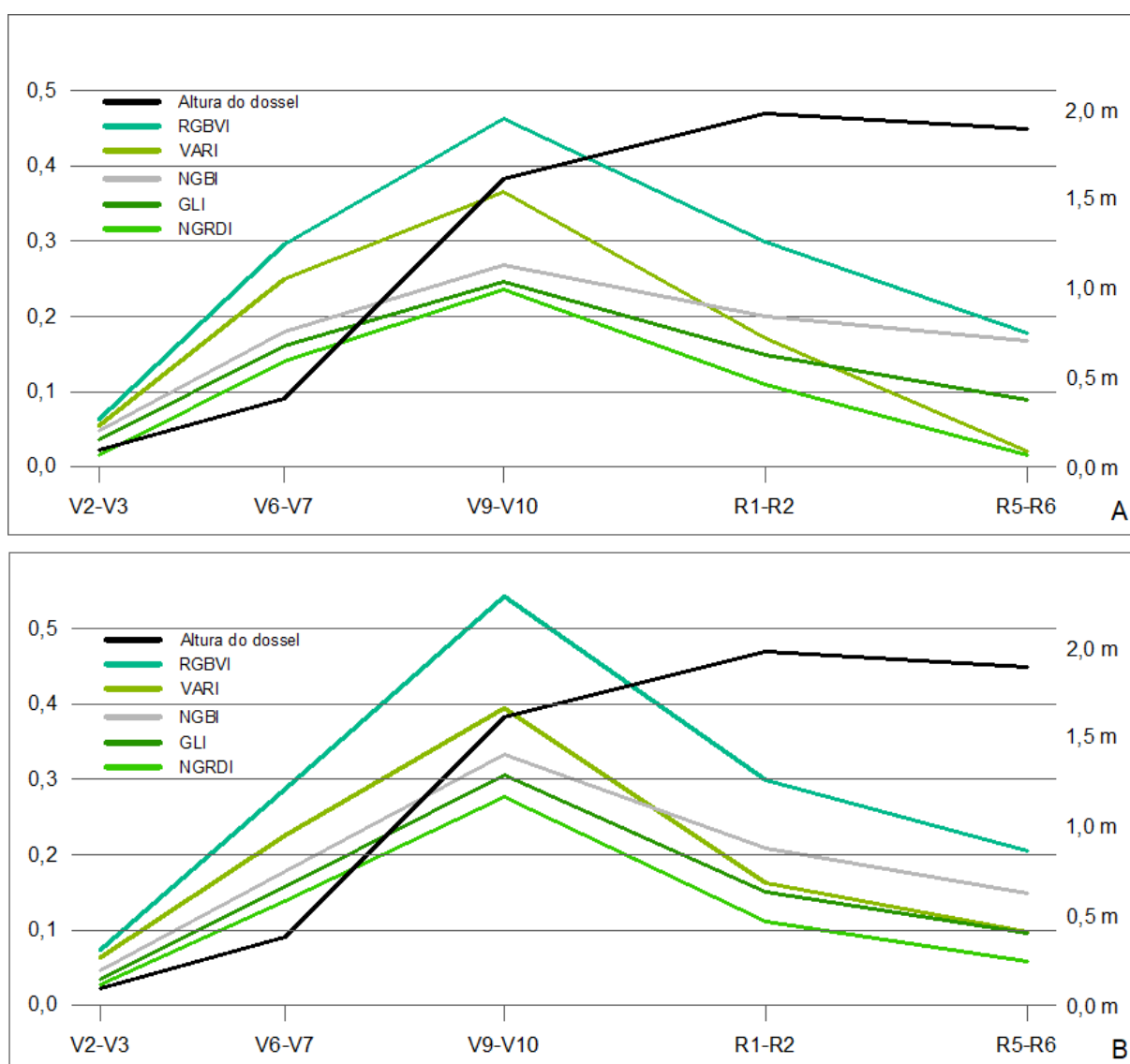
Para o estágio V3, os baixos valores médios dos índices de vegetação refletem o referido estágio de desenvolvimento pois a área foliar ocupa uma parcela pequena da superfície do solo.

Em relação ao estágio V6, a separação solo/planta permitiu a diferenciação dos valores médios entre os índices. Testes realizados sem a separação de pontos apresentaram o valor médio 0,11 para os índices NGRDI, GLI e NGBI e respectivamente os valores 0,20 e 0,21 para os índices VARI e RGBVI.

Os valores médios mais altos para todos os índices referem-se ao estágio vegetativo V10. A partir deste estágio V10, os valores médios decrescem nos estádios reprodutivos R1 e R6.

Apresenta-se graficamente por meio da Figura 42A e da Figura 42B a dinâmica temporal do dossel da cultura do milho nos recortes A e B, conforme as alturas médias estimadas e valores médios dos índices de vegetação calculados neste experimento.

Figura 42 - Dinâmica temporal do dossel da cultura do milho



Fonte: O autor.

Nota: Gráficos representando a fenologia da lavoura de milho em função de índice médio de 5 índices de vegetação e do ganho da estatura média das plantas, respectivamente para os recortes A e B. A altura média representada pela linha em preto é resultado do cálculo das distâncias entre os pontos do recorte e do MDT, via técnica *Compute cloud/mesh distance*.

Verifica-se por meio da Figura 42A e 42B, que até o estágio vegetativo V10, o aumento da estatura média é diretamente proporcional ao aumento dos índices médios de vegetação estimados e a partir do estágio reprodutivo R1, inicia-se a fase de latência quando o milho deixa de adquirir estatura. Entretanto, os valores médios dos índices passam a diminuir até atingir a fase de senescência R6.

Conforme Chibane *et al.* (2021), o teor de clorofila diminui nos estádios posteriores ao florescimento. Assim, espera-se que os valores para os índices de vegetação sejam cada vez menores ao longo do tempo até que acabe o ciclo de vida da planta, indicando o estágio de desenvolvimento reprodutivo do milho.

Assim, o gráfico representa o monitoramento fenológico da lavoura por meio do aumento do porte das plantas e utilizando-se de valores de índices de vegetação que refletem a atividade da clorofila no dossel.

Entretanto, apesar dos valores médios dos índices verificados no estágio R1 indicarem o desenvolvimento da cultura devido ao fato da diminuição da atividade fotossintética na fase reprodutiva (PEARSON, 1984), os mesmos não servem como valores de referência para caracterizar o referido estágio do milho, pois a cultura passou por estresse hídrico e foi atacada por fungos. O estresse hídrico pode causar aceleração da senescência foliar (FAO, 2012) e favorecer o aparecimento de fungos (SILVA, 2016). Não foi possível avaliar em que medida os valores médios dos índices estimados para os estádios reprodutivos foram afetados.

A presença do patógeno é um sintoma do estresse hídrico que favorece a infecção e altera a fotossíntese. Desta forma ocorre aceleração da senescência foliar, diminuindo os valores dos índices de vegetação que poderiam caracterizar o estágio fenológico.

Buscou-se com o experimento realizado nesta seção, demonstrar que o estágio fenológico pode ser caracterizado por meio da aplicação de índices de vegetação, pois estes têm seus valores determinados em função da atividade fotossintética.

4.5 CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E CRESCIMENTO

Apesar da distribuição dos dados dos valores dos índices nas nuvens de pontos serem consideradas não normais, verificou-se que na fase de desenvolvimento logarítmica do milho, o aumento da altura média do dossel mostrou-se diretamente

proporcional ao aumento dos índices médios de vegetação. Assim, realizou-se a linearização do referido intervalo da curva de *Gompertz*, conforme os estádios V6 e V10.

As equações da reta que expressam matematicamente o comportamento entre os valores dos índices de vegetação e o crescimento em estatura no intervalo de desenvolvimento entre V6 e V10, são apresentadas na Tabela 5, bem como os valores dos índices de correlação de Pearson (R) e índices de correlação de Spearman (ρ).

Tabela 5 - Correlações entre índices de vegetação e crescimento do milho

Recorte A					Recorte B			
Índice	Equação	R ²	R	ρ	Equação	R ²	R	ρ
NGRDI	$y = 0,0814x + 0,1132$	0,27	0,52	0,58	$y = 0,1155x + 0,0902$	0,41	0,64	0,64
RGBVI	$y = 0,1431x + 0,2454$	0,31	0,56	0,56	$y = 0,2066x + 0,2136$	0,47	0,69	0,65
GLI	$y = 0,0784x + 0,1307$	0,27	0,52	0,54	$y = 0,1216x + 0,1091$	0,42	0,65	0,63
VARI	$y = 0,1023x + 0,2102$	0,20	0,45	0,52	$y = 0,1478x + 0,1616$	0,41	0,64	0,63
NGBI	$y = 0,0771x + 0,1496$	0,21	0,45	0,43	$y = 0,0765x + 0,1508$	0,22	0,47	0,47

Fonte: O autor.

Tabela 5: Modelos de correlação linear entre as alturas estimadas do dossel e os índices de vegetação calculados utilizando-se dos pontos referentes dos estádios V6 e V10. Apresenta-se também os coeficientes de correlação de Pearson (R) e Spearman (ρ).

As equações expressam matematicamente o comportamento entre os valores dos índices de vegetação e o ganho em estatura no intervalo do milho antes da fase de diminuição da taxa de crescimento, conforme Kochhar e Gujral (2020).

Demonstra-se com os baixos valores dos coeficientes R² que a altura das plantas não determina valores para os índices de vegetação, ocorrendo somente resultados não significativos. Porém, observa-se pelos valores de R que existe correlação positiva moderada entre as variáveis supracitadas (intervalo entre 0,4 e 0,6).

Levando-se em consideração os resultados dos testes de Spearman (ρ) para dados não normais, a correlação entre os valores dos índices de vegetação e o crescimento em estatura do milho, também apresentou correlação positiva e moderada. O índice de vegetação que apresentou maior correlação com o crescimento do milho por meio do teste de Spearman no recorte A foi o NGRDI (0,58) e no recorte B foi o RGBVI (0,65), conforme apresentado na Tabela 5.

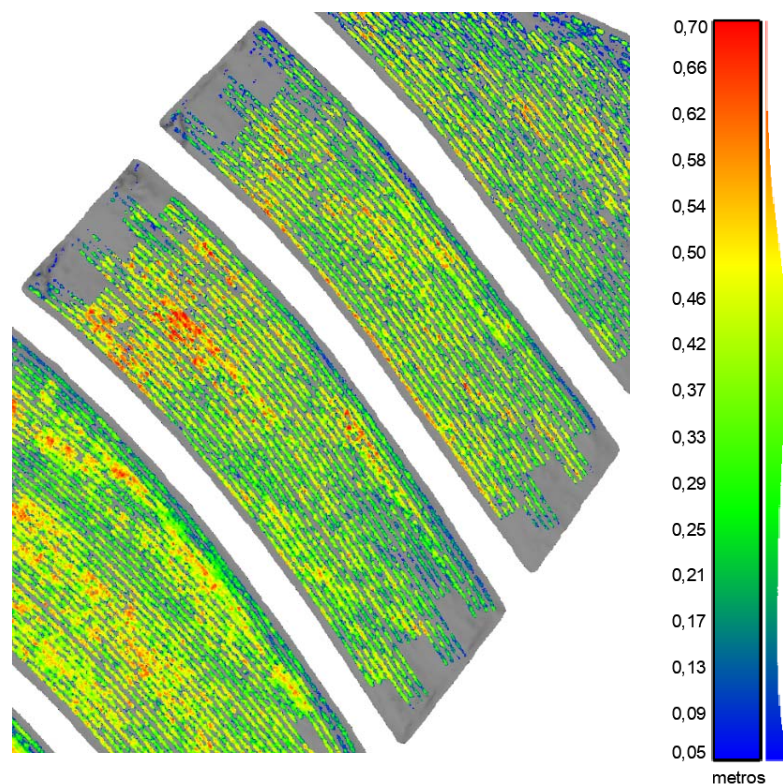
4.6 ANÁLISES QUALITATIVAS

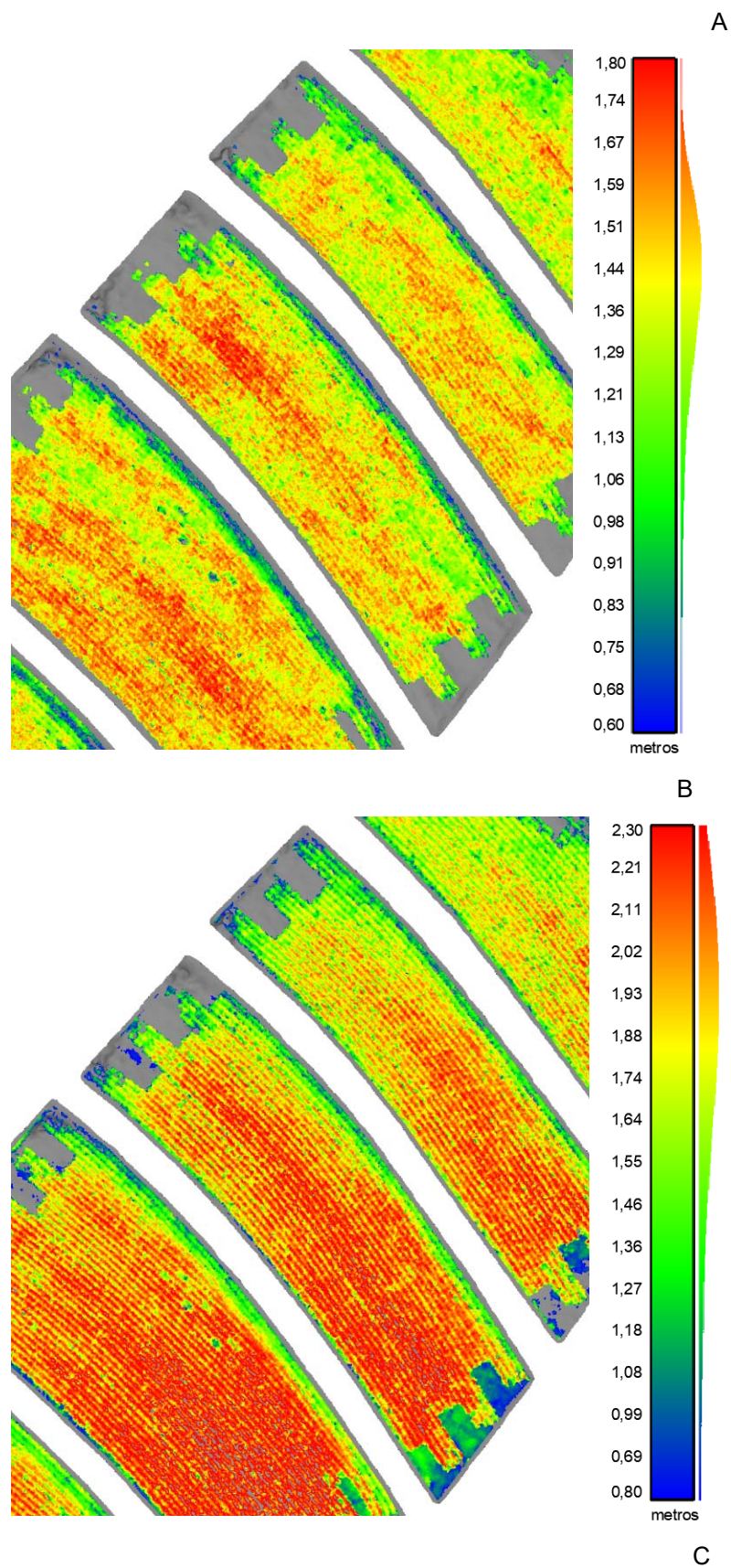
Ao computar-se as distâncias euclidianas por meio da técnica *Compute cloud/mesh distance*, ocorre a classificação dos pontos por faixas de altura das plantas e os pontos da nuvem passam a ser demonstrados em classes separadas por cores, permitindo a identificação visual da estrutura geral da lavoura.

Por meio da diferenciação das cores, verifica-se que a lavoura do milho se desenvolve de maneira heterogênea, onde cada linha de plantio, apresenta um crescimento próprio. A verificação do estágio fenológico pode ser constatada por meio do ganho em estatura do dossel que é evidenciada aplicando-se filtragens a partir de parâmetros de altura obtidos pela análise do histograma da nuvem.

Na Figura 43 (A, B e C), apresenta-se o resultado do processo de classificação seguido de filtragem, respectivamente para os estádios de desenvolvimento V6, V10 e R1. As alturas das plantas são representadas por meio da variação de cores, do azul passando pelo verde, amarelo, laranja e culminando no vermelho. Destaca-se que a cor cinza representa o MDT sem a informação de altura nos dados.

Figura 43 - Realce de locais com baixo desenvolvimento das plantas





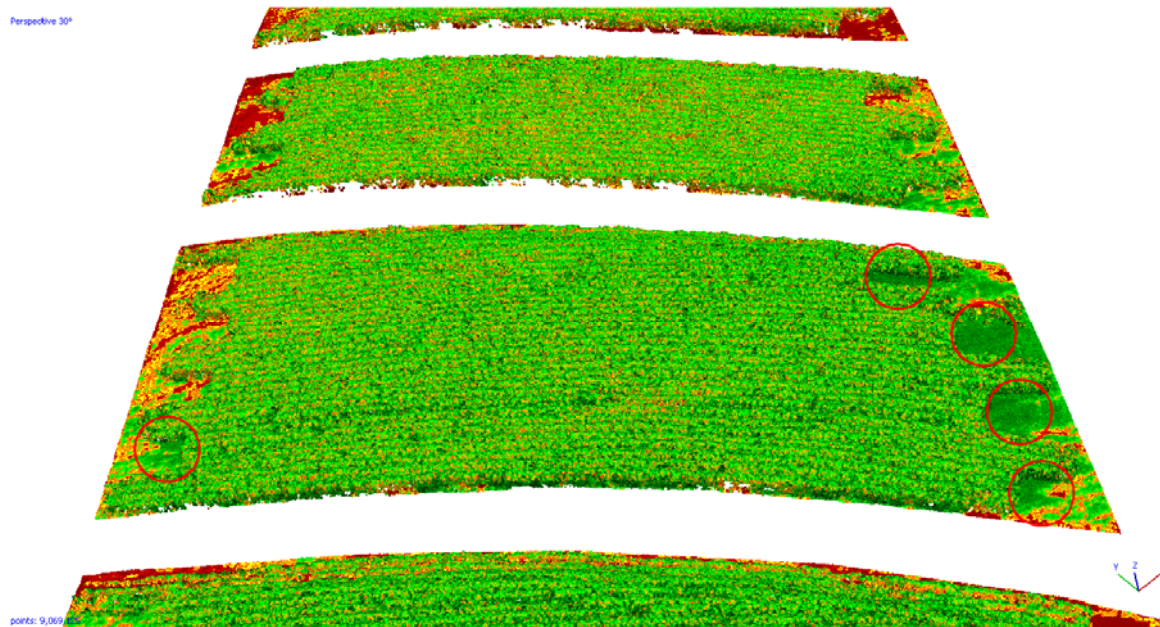
Fonte: O autor.

Nota: Nuvem de pontos referente ao estádio V6 (43A), V10 (43B) e R1 (43C). As diferentes cores representam as alturas das plantas. O modelo MDT é representado nas cores cinza sob a cultura

Analisando-se a Figura 43 (A, B e C), percebe-se que a filtragem da nuvem permitiu o realce de informações sobre o estado da cultura. As linhas de plantio na cor azul, referem-se a plantas de milho de menor estatura. Conforme verificado em campo, as linhas mais próximas aos limites das parcelas, apresentam plantas de menor porte. Assim, também é possível identificar entre um estágio de pós-emergência (43A) com as linhas de plantio facilmente identificáveis, intermediário (43B) com as linhas de plantio fechadas ou avançado de desenvolvimento (43C) com a altura máxima de desenvolvimento para o genótipo sendo constatada.

As Figuras 44 e 45, representam dois exemplos de análises visuais que podem ser realizadas em nuvens de pontos classificadas por meio de índices de vegetação. No primeiro caso (aplicação do índice GLI), a classificação tridimensional permitiu separar solo, plantas e ervas daninhas, destacadas com círculos vermelhos na Figura 44, pois estas apresentavam maior atividade da clorofila em comparação com as plantas de milho. No segundo caso (aplicação do índice NGRDI), demonstra-se a detecção de falhas na cultura (Figura 45).

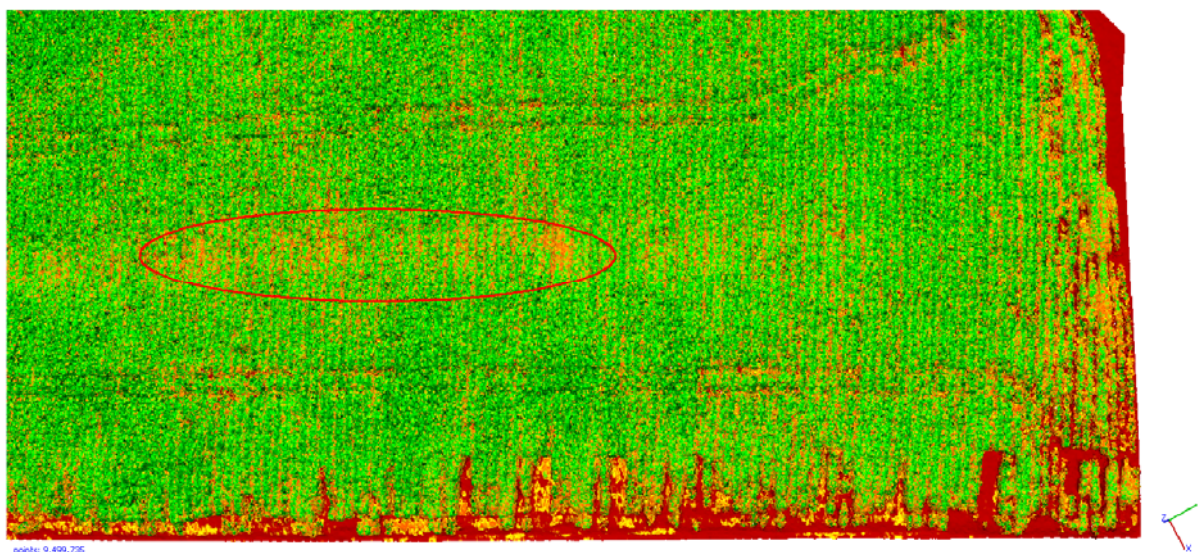
Figura 44 - Índice GLI aplicado a nuvem de pontos



Fonte: O autor

Nota: Nuvem de pontos classificada em perspectiva dos terraços 3 e 4. A maior atividade fotossintética é demonstrada pelas plantas daninhas localizadas nos pontos destacados por círculos na imagem. Esta informação é corroborada pela verificação da baixa estatura em relação ao dossel da cultura.

Figura 45 - Índice NGRDI aplicado a nuvem de pontos



Fonte: O autor

Nota: Nuvem de pontos classificada da megaparcela sem terraços. Verifica-se que pontos foram classificados com menor valor de índice de vegetação na parte central da imagem, demonstrando um problema que está ocorrendo com a cultura. Em campo constatou-se que este local apresentava plantas de baixa estatura e com tom de verde menos intenso e infecção por fungo, conforme.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nos objetivos propostos buscou-se técnicas computacionais que permitam o monitoramento da cultura do milho a partir do processamento de imagens obtidas por meio da RPA. Com os experimentos realizados até o presente estágio da pesquisa verificou-se que:

- Os equipamentos e técnicas utilizadas mostraram-se viáveis para o monitoramento da cultura e como uma alternativa promissora para diminuição do esforço amostral em pesquisas fenológicas.
- Pode-se monitorar o desenvolvimento da cultura do milho a partir dos histogramas das alturas dos diferentes objetos da cena, pois verifica-se o aumento da frequência dos pontos referentes as plantas e a diminuição dos pontos que representam o solo em um gráfico bimodal ao longo do tempo nas nuvens de pontos.
- Constatou-se o desenvolvimento do milho no estágio inicial analisado. Os índices de vegetação aplicados demonstraram-se eficientes em realizar a separação solo/planta nas nuvens de pontos, verificando-se o potencial produtivo da cultura. O índice de vegetação NGRDI mostrou-se adequado para monitorar a fenologia do milho em função da atividade fotossintética do dossel.
- Demonstrou-se que os valores médios dos índices de vegetação refletem a evolução do dossel com potencial para se inferir o estágio fenológico em que se encontra a cultura. Verificou-se também que existe correlação moderada entre aumento do valor do índice médio e aumento do porte das plantas, conforme a verificação dos valores dos coeficientes de correlação de Spearman.
- Os procedimentos elaborados utilizando-se de nuvens de pontos SfM-MVS para verificação do crescimento pela frequência (por meio do qual constata-se o ganho de estatura do milho ao longo do tempo) e desenvolvimento em função dos índices de vegetação (por meio do qual um estágio pode ser caracterizado utilizando-se de estatística descritiva), permitiram o acompanhamento do desenvolvimento da cultura do milho ao longo de seu ciclo fenológico.

Baseando-se nos experimentos de análise dos dados gerados por meio do processamento das imagens obtidas a partir da RPA, verificou-se a necessidade da realização de voos em outros estádios de desenvolvimento, principalmente quando a cultura se encontra na fase de florescimento pois é quando o milho apresenta maior atividade fotossintética. O experimento pode ser realizado novamente com a inclusão de outros estádios fenológicos para caracterização da fase de diminuição do crescimento, conforme a curva sigmoide.

Recomenda-se que um novo levantamento GNSS seja realizado na área das megaparcels, pois não foi possível aferir a altitude média do dossel no estádio V3.

São necessários estudos complementares para aferição de outros parâmetros biofísicos utilizados para verificação do desenvolvimento das culturas e saúde das plantas, tais como índice de área foliar e estimativa de biomassa. Propõem-se que o índice de área foliar seja calculado utilizando-se do algoritmo *Full Lambda Schedule Algorithm* - FLSA, por meio da extração automática de atributos.

As técnicas computacionais pesquisadas para extrair das nuvens, pontos que representam solo, palhada ou ervas daninhas, podem ser refinadas permitindo uma estimativa mais fidedigna da altura média da cultura.

REFERÊNCIAS

ABLANEDO, E. S. *et al.* Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1606, 2018.

ADOBE. **Digital Negative (DNG)**. Disponível em: <https://helpx.adobe.com/br/photoshop/digital-negative.html>. Acesso em: 02 out. 2020.

Agisoft. **Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.3.0**, 2017. Disponível em: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_python_api_1_3_0.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.

AGROCERES. **Produto AG9025**. Disponível em: http://www.sementesagrocere.com.br/pages/Produto_AG_9025.aspx. Acesso em: 19 out. 2020.

ÁGUAS PARANÁ. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br.html>. Acesso em: 28 mar. 2020.

AKGUL, M. *et al.* Evaluation of UAV and GNSS Based DEMs for Earthwork Volume. **Arab J Sci Eng**, v. 43, p. 1893-1909, 2018.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial** - RBAC-E, n. 94, 2017.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBRR, 246 p., 1998.

ANTHONY, D. *et al.* On Crop Height Estimation with UAVs. In: **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, Chicago, p. 4805-4812, 2014.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; SANGOI, L. Maize Plant Arrangement: Analysis of the State of the Art. **Ciência Rural**, v. 31, n.11, p. 1075-1084, 2001.

ASP - American Society of Photogrammetry. **Manual of Photogrammetry**, 1220 p., 1966.

BENDIG, J. *et al.* Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. **Remote Sensing**, v. 6, n. 11, p. 10395-10412, 2014.

BENDIG, J. *et al.* Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, n. 39, p. 79-87, 2015.

BERGER, M. *et al.* State of the Art in Surface Reconstruction from Point Clouds. In: **EUROGRAPHICS star reports**, v. 1, n. 1, 2014.

BRACHTVOGEL, E. L. *et al.* População, arranjo de plantas uniforme e a competição intraespecífica em milho. **Revista Trópica**, v.6, n.1, p.75-83, 2012.

BRASIL. **Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d89817.htm
Acesso em: 18 ago. 2021.

BUCHAILLOT, M. L. *et al.* Evaluating Maize Genotype Performance under Low Nitrogen Conditions Using RGB UAV Phenotyping Techniques. **Sensors**, v. 19, n. 8, p.1815, 2019.

CALOU, V. B. *et al.* Estimation of Maize Biomass Using Unmanned Aerial Vehicles. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 6, p. 744-752, 2019.

CÂMARA, G. Representação computacional de dados geográficos. In: **Banco de Dados Geográficos**, Brasil, 506 p., 2005.

CNA. **Comunicação Social – Sistema FAEP/SENAR-PR**. Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/noticias/rede-pesquisa-erosao-em-todas-as-regioes-do-parana>. Acesso em: 10 nov. 2020.

CARGNELUTTI FILHO, A.; LÚCIO, A. D.; LOPES, S. J. **Experimentação Agrícola e Florestal**. UFSM, Departamento de Fitotecnia, Santa Maria, 206 p., 2009.

CHAWADE, A. *et al.* High-Throughput Field-Phenotyping Tools for Plant Breeding and Precision Agriculture. **Agronomy**, v. 9, n. 258, 2019.

CHEN Z.; GUEVARA J. A. Systematic selection of very important points (VIP) from digital terrain model for constructing triangular irregular networks. In: **Eighth International Symposium on Computer-Assisted Cartography – Auto-Carto 8**, USA, p. 50-56, 1987.

CIE. Colorimetry. **Commission Internationale de l’Eclairage**. CIE n. 15.2, Vienna, 1986.

CHIBANE, N. *et al.* Relationship between Delayed Leaf Senescence (Stay-Green) and Agronomic and Physiological Characters in Maize (*Zea mays* L.). **Agronomy**, v. 11, n. 276, 2021.

CINAT, P. Comparison of Unsupervised Algorithms for Vineyard Canopy Segmentation from UAV Multispectral Images. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1023, 2019.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79-97, 2014.

CQFS RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Comissão de Química e Fertilidade do Solo, Núcleo Regional Sul, Porto Alegre, 400 p., 2004.

CRUZ, G. C. F. Alguns aspectos do clima dos Campos Gerais. In: MELLO, M. S.; MORRO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. **Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná**. Ponta Grossa: UEPG, p. 59-72, 2007.

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

DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Instrução de Comando da Aeronáutica (ICA) 100-40**. Brasil, Ministério da Defesa, 56 p., 2019

DEZEM, L. G.; MADALOSSO, P.; BRANDÃO, A. A. **Produtividade de milho em diferentes velocidades de semeadura**. Univag Centro Universitário, 2020.

DJI. **JPEG vs RAW**, 2017. Disponível em: <https://store.dji.com/guides/jpeg-vs-raw-what-is-the-difference/> Acesso em: 02 out. 2020.

DRONE II. **Drone Infographics & Charts**, 2018. Disponível em: <https://droneii.com/infographics>. Acesso em: 22 out. 2020.

DSG. **Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)**. Brasil, 2016.

EGSA. **GNSS**. Disponível em: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss> Acesso em: 06 set. 2020.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 353 p., 2013.

EMBRAPA. **Cultivo do milho**. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, 2010.

ENCISO, J. *et al.* Validation of agronomic UAV and field measurements for tomato varieties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 158, p. 278-283, 2019.

ENVI 5.3. Broadband Greenness. **Exelis Visual Information Solutions Inc. Software Documentation**, 2015.

FANCELLI, A. L. Fenologia do Milho e Implicações Práticas para Manejo. In: **Milho Estratégias de Manejo**. São Paulo, USP, p. 1, 2013.

FAO. Agricultural Outlook 2019-2028. **OECD**, Rome, 324 p., 2019.

FAO. Crop yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper Nr. 66**, Rome, 502 p., 2012.

FAVARATO, L. F. *et al.* Crescimento e produtividade do milho-verde sobre diferentes coberturas de solo no sistema plantio direto orgânico. **Bragantia**, v. 75, n. 4, p. 497-506, 2016.

FERREIRA, A.O. **Compartimentos da matéria orgânica como indicadores do sequestro de carbono em sistema plantio direto de longa duração**. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual de Ponta Grossa, p. 98, 2009.

FILEFORMAT.INFO. **Wavefront OBJ File Format Summary**. Disponível em: <https://www.fileformat.info/format/wavefrontobj/egff.htm>. Acesso em: 16 dez. 2020.

GALINAT, W. C.; NAYLOR, A. W. Relation of photoperiod to inflorescence proliferation in *Zea mays*. **American Journal of Botany**, v. 38, n. 1, p. 38-47, 1951.

GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: Spatial Data Analysis**. 6ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 720 p., 2017.

GIRARDEAU-MONTAUT, D. *et al.* Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. In: **ISPRS Workshop - Laser scanning**, Enschede, Netherlands, 6 p., 2005.

GIRARDEAU-MONTAUT, D. **CloudCompare Version 2.6.1 User Manual**, 2015.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y.J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p. 76-87, 2002.

GNÄDINGER, F.; SCHMIDHALTER, U. Digital counts of maize plants by unmanned aerial vehicles (UAVs). **Remote Sensing**, v. 9, n. 6, p. 544, 2017.

GONÇALVES, G. Analysis of interpolation errors in urban digital surface models created from LIDAR data. In: **Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences**, Portugal, p. 5-7, 2006.

GONZALEZ, F. MCFADYEN, A. PUIG, E. Advances in Unmanned Aerial Systems and Payload. In: **Advances in Agricultural Machinery and Technologies**. CRC Press, p. 133, 2018.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. **Processamento de Imagens Digitais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 624 p., 2009.

GRENDÖRFFER, G. J. Crop height determination with UAS point clouds. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Denver, USA, 2014: ISPRS Archives, v. XL-1, p. 135-140.

GUO, Z.C. *et al.* Biomass and vegetation coverage survey in the Mu Us sandy land - based on unmanned aerial vehicle RGB images. **International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation**, n. 94, 2021.

GURGEL, F. L.; FERREIRA, D. F.; SOARES, A. C. S. O Coeficiente de Variação como Critério de Avaliação em Experimentos de Milho e Feijão. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, EMBRAPA**, n. 85, 2013.

HAGER, I. Corn Growth Stage and Postemergence Herbicides. **Department of Crop Sciences**, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2018.

HUNT, E. R. JR. *et al.* Evaluation of Digital Photography from Model Aircraft for Remote Sensing of Crop Biomass and Nitrogen Status. **Precision Agriculture**, n. 6, p. 359-378, 2005.

HERMANN, A. Assessment of maize yield and phenology by drone-mounted superspectral camera. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 1, p. 51-76, 2020.

HERRERO-HUERTA, M. *et al.* Canopy Roughness: A New Phenotypic Trait to Estimate Aboveground Biomass from Unmanned Aerial System. **Plant Phenomics**, v. 1, 10 p., 2020.

IAC. **Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing**. Disponível em: <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>
Acesso em: 02 out. 2020.

IBGE. Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos - GPS. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, Brasil, 2008.

IBGE. Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, Brasil, 2017.

IBGE. IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, Brasil, 2020.

ISELI, C.; LUCIEER A. Tree species classification based on 3D spectral point clouds and orthomosaics acquired by snapshot hyperspectral UAS sensor. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Enschede, The Netherlands, 2019: ISPRS Archives, v. XLII-2/W13, p. 10-14.

JAGT, B. V. *et al.* Snow Depth Retrieval with UAS Using Photogrammetric Techniques. **Geosciences**, n. 5, p. 264-285, 2015.

JENSEN, J. L. R.; MATHEWS, A. J. Assessment of Image-Based Point Cloud Products to Generate a Bare Earth Surface and Estimate Canopy Heights in a Woodland Ecosystem. **Remote Sensing**, v. 8, n. 50, 2016.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. Pearson Education Limited, 2014.

KOCHHAR, S. L.; GUJRAL, S. L. **Plant Physiology: Theory and Applications**. Cambridge University Press, 866 p., 2020.

LAGUE, D.; BRODU, N.; LEROUX, J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z). **ISPRS Journal of Photogrammetric Remote Sensing**, n. 82, p. 10-26, 2013.

LELONG C. C. D. *et al.* Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. **Sensors**, v. 8, n. 5, 2008.

LIU, H.; TANG, X.; SHEN, S. Depth-map completion for large indoor scene reconstruction. **Pattern Recognition**, v. 99, p. 1-11, 2020.

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M.M.; JOHNSON, D.E. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. **Geocarto International**, v. 16, p. 65-70, 2001.

LU, J. *et al.* Combining plant height, canopy coverage and vegetation index from UAV-based RGB images to estimate leaf nitrogen concentration of summer maize. **Biosystems Engineering**, n. 202, 2021.

LUO, S. *et al.* Effects of LIDAR point density, sampling size and height threshold on estimation accuracy of crop biophysical parameters. **Optical Society of America**, v. 24, n. 11, 2016.

MADEC, S. *et al.* High-throughput phenotyping of plant height: comparing unmanned aerial vehicles and ground LIDAR Estimates. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 2002, 2017.

MAES, W. H.; STEPPE, K. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. **Trends in Plant Science**, v. 24, n. 2, 2019.

MANIN, J.; SKEEN, S. A.; PICKETT L.M. Performance comparison of state-of-the-art high-speed video cameras for scientific applications. **Optical Engineering**, v. 57, n. 12, 2018.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. Brasport, Rio de Janeiro, 1999.

MATHER, P. M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images**. John Wiley & Sons Inc., 350p., 2004.

MICHEZ, A. *et al.* How Far Can Consumer-Grade UAV RGB Imagery Describe Crop Production? A 3D and Multitemporal Modeling Approach Applied to *Zea mays*. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1798, 2018.

MEDRI, W. **Análise exploratória de Dados**. Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 82 p., 2011.

MITAS, L., MITASOVA, H. Spatial interpolation. In: **Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications**, Wiley, v.1, p. 481-492, 1999.

MOHANTY, S. K.; SWAIN, M. R. Bioethanol Production From Corn and Wheat: Food, Fuel, and Future. In: **Bioethanol Production from Food Crops: Sustainable Sources, Interventions, and Challenges**. Academic Press, p. 45, 2019.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: ed. UNESP. 480p. 2008.

MOORE, I. D., GRAYSON, R. B. LADSON, A. R. Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, And Biological Applications. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 3-30, 1991.

MOTOHKA, T. *et al.* Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. **Remote Sensing**, v. 2, p. 2369-2387, 2010.

NAKAO, L. T. H.; KRUEGER, C. P. Análise dos Métodos de Posicionamento e dos Parâmetros Definidores da Qualidade de um Levantamento Batimétrico. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 3, p. 419-433, 2017.

NIAG. Pre-Feasibility Study on UAV Autonomous Operations. **NATO Industrial Advisory Group**, SG/75, 2004.

NIU, Y. *et al.* Estimating Above-Ground Biomass of Maize Using Features Derived from UAV-Based RGB Imagery. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1261, 2019.

OLSSON, C.; ERIKSSON, A. HARTLEY, R. Outlier removal using duality. In: **Computer Vision and Pattern Recognition**, 2010.

ONIGA, V. E.; BREABAN, A. I.; STATESCU, F. Determining the Optimum Number of Ground Control Points for Obtaining High Precision Results Based on UAS Images. **Proceedings**, v. 2, n. 352, 2018.

PEARSON, C. *et al.* Development and source-sink effects on single leaf and canopy carbon dioxide exchange in maize. **Field Crops Research**, v. 9, p. 391-402, 1984.

PIONEER. **Quais os estádios fenológicos do milho**. Disponível em: <http://www.pioneersementes.com.br/milho/pioneer-responde/90/quais-os-estadios-fenologicos-do-milho>. Acesso em: 23 fev. 2021.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. Parêntese, 135 p., 2007.

POYNTON, C.A. **Frequently Asked Questions about Color**. Color FAQ, 1997.

RANUM, P.; ROSAS, J. P. P.; CASAL, M. N. G. Global maize production, utilization, and consumption. **Annals of the New York Academy of Sciences**, New York, p. 105-112, 2014.

REITSMA, K. D.; CLAY, S. A.; HALL, R. G. Corn Growth and Development. In: **Best Management Practices for Corn Production in South Dakota**. SDSU Extension Circulars, South Dakota State University, 2009.

RICHARDS, J. A.; JIA X. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

ROSA, J.Z. **Diagnóstico de Processos Erosivos em Solos Agrícolas Mediante Análise de Modelos Numéricos do Terreno**. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual de Ponta Grossa, p. 95, 2018.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains. In: **Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**, Technical Presentations, NASA SP-351, v. 1, 1974.

SALEEM, S. *et al.* Image fusion-based contrast enhancement. **EURASIP Journal on Image and Video Processing**, v. 1, n. 10, 2012.

SAMPAIO, T. V. M.; BRANDALIZE, M. C. B. **Cartografia Geral, Digital e Temática Volume 1**. 1. ed. Curitiba: UFPR, 2018.

SCHARSTEIN D., SZELISKI R. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. **International Journal of Computer Vision**, v. 47, p. 4-47, 2002.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing**. Academic Press, 2007.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. 2. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 589 p. 2003.

SHAFIAN, S. *et al.* Unmanned aerial systems-based remote sensing for monitoring sorghum growth and development. **PloS ONE**, v. 13, n. 5, 2018.

SHIMADA, S. *et al.* A new spectral index to detect Poaceae grass abundance in Mongolian grasslands. **Advances Space Research**, v. 50, p. 1266-1273, 2012.

SIEBERTH, T.; WACKROW, R.; CHANDLER, J. H. UAV image blur - it's influence and ways to correct it. In: **International Conference on UAVs in Geomatics**, Toronto, 2015: ISPRS Archives, v. XL-1/W4, p. 33-39.

SILVA, D. D. *et al.* Carvão comum do milho no Brasil: Conheça esta Doença. **Circular Técnica 222**, Sete Lagoas, 6 p., 2016.

SILVA, J. G.; KLUTHCOUSKI, J.; SILVEIRA, P. M. Desempenho de uma semeadora-adubadora no estabelecimento e na produtividade da cultura do milho sob Plantio Direto. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p.7-12, 2000.

SILVA, P. R. F. *et al.* **Arranjo de plantas e sua importância na definição da produtividade do milho**. Porto Alegre, UFRGS, UDESC, 63 p., 2006.

SILVA, R. K.; RIBEIRO, S. R. A. Análise de nuvens de pontos geradas de forma semicontrolada para verificação do crescimento das plantas de milho a partir de dados obtidos em diferentes alturas de voo. In: **7ª Conferência Ibero Americana de**

Computação Aplicada, Portugal, 2020. Atas das Conferências Ibero-Americanas, IADIS. p. 217-221.

SU, W. *et al.* Phenotyping of Corn Plants Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2021, 2019.

SZELISKI, R. **Computer Vision: Algorithms and Applications**, p. 967, 2010.

TATTARIS, M.; REYNOLDS, P. R.; CHAPMAN S.C. A. Direct Comparison of Remote Sensing Approaches for High-Throughput Phenotyping in Plant Breeding. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. 1131, 2016.

TECHNODE. 2018. Disponível em: <https://technode.com/2018/01/03/worlds-top-drone-seller-dji-made-2-7-billion-2017/> Acesso em: 22 out. 2020.

TETILA, E. C. *et al.* Identification of Soybean Foliar Diseases Using Unmanned Aerial Vehicle Images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 14, n. 12, p. 2190-2194, 2017.

TIRADO, S. B. *et al.* UAV-based imaging platform for monitoring maize growth throughout development. **Plant Direct**, v. 4, n. 6, 2020.

TORRES, S. J. *et al.* Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 103, p. 104-113, 2014.

TRIGGS, B. *et al.* **Bundle adjustment - a modern synthesis**. InVision Algorithms: Theory and Practice, 2000.

TSOUROS, D. C.; BIBI, S.; SARIGIANNIDIS, P. G. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. **Information**, v. 10, p. 349, 2019.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.

USDA. World Agricultural Production. **Circular series WAP 1-20**, FAS, Global Market Analysis, 34 p., 2020.

USDA. Maize Diseases Handout. **USDA Sanitary Phytosanitary Project**
Disponível em: <https://ag.purdue.edu/ipia/Documents/>
Acesso em: 20 jun. 2021.

VERGARA-DÍAZ, O. *et al.* A novel remote sensing approach for prediction of maize yield under different conditions of nitrogen fertilization. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, 2016.

VIÑA, A. *et al.* Monitoring Maize (*Zea mays* L.) Phenology with Remote Sensing. **Agronomy Journal**, n. 96, p. 1139-1147, 2004.

ZHU, Y. *et al.* Estimation of maize above-ground biomass based on stem-leaf separation strategy integrated with LIDAR and optical remote sensing data. **PeerJ**, v. 7, n. 7593, 2019.

ZHU, W. *et al.* Estimating Maize Above-Ground Biomass Using 3D Point Clouds of Multi-Source Unmanned Aerial Vehicle Data at Multi-Spatial Scales. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2678, 2019.

YANG, N. *et al.* Contributions of *Zea mays* subspecies mexicana haplotypes to modern maize. **Nature Communications**, v. 8, p. 2017.

WANG, J.; ZHANG, Y.; GU, R. Research Status and Prospects on Plant Canopy Structure Measurement Using Visual Sensors Based on Three-Dimensional Reconstruction. **Agriculture**, v. 10, n. 462, 2020.

WEISMANN, M. Fases de desenvolvimento da cultura do milho. In: **Tecnologias e produção: Milho safrinha e culturas de inverno**, Fundação MS, p. 31-38, 2008.

WYSZECKI, G. STILES, W.S. **Color Sciences: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae**. John Wiley & Sons, 2000.

WOODS, J. W. **Multidimensional Signal, Image, Video Processing and Coding**. 2. ed. New York: Elsevier, 2012.

APÊNDICE A – OUTRAS VALIDAÇÕES

Validação para escala 1:1.000: Classe B

GeoPEC - Avaliação da Acurácia Posicional - [Acurácia Posicional - Decreto 89.817 / ET-CQDG]

Arquivo Entrada de dados Acurácia Posicional Amostragem Relatório Ajuda

Acurácia Posicional (Decreto 89.817 / ET-CQDG) - Planimetria

Escala de teste: 1/1000 Area de Estudo: 2,54 Unidades: ha

Nº Pts Total: 21
Nº Pts Excluídos do cálculo: 0

Distribuição Espacial | Teste de Normalidade | Tendência | Decreto 89.817 / ET-CQDG | Acurácia (Resumo Resultados)

Análise da Precisão

Decreto / ET-CQDG: **Classe B**

Classe B

Análise das tendências

T de Student: **Não Tendencioso**

Média direcional: **Não Tendencioso**
variância circular

Não há Tendência

Padrão de Dist. Espacial

Vizinho mais próximo:
1ª ordem: **Disperso**
2ª ordem: **Disperso**
3ª ordem: **Disperso**

ACURÁCIA

Produto Acurado para a Classe B na escala 1/1000

[Metodologia Santos et al. (2016)]

Teste de Normalidade: **Amostra Normal**

Estadísticas	Este	Norte	Posicional	Ponto	Descrição	Discrep. E(m)	Discrep. N(m)	Discrep. Resultante	Azimute	Excluir?	Outlier
nº pontos	21	21	21	101	controle	-0,116	0,032	0,1203	285,4222		Não
média	-0,0306	0,0537	0,2055	42	controle	-0,157	0,099	0,1856	302,2344		Não
desvio	0,1842	0,1546	0,1322	45	controle	-0,036	0,012	0,0379	288,4349		Não
variância	0,034	0,024	0,017	46	controle	-0,033	0,05	0,0599	326,5752		Não
RMS	0,1823	0,1601	0,2426	48	controle	0,088	-0,021	0,0905	103,4218		Não
máximo	0,489	0,337	0,4893	50	controle	-0,178	0,301	0,3497	329,4015		Não
mínimo	-0,3972	-0,272	0,0379	51	controle	-0,003	0,05	0,0501	356,5664		Não
curtose	4,124	2,660	2,012	55	controle	0,161	0,015	0,1617	84,6772		Não
assimetria	0,633	-0,240	0,499	58	controle	-0,2	-0,199	0,2821	225,1436		Não
soma	0,679	0,478	0,350	67	controle	-0,005	0,117	0,1171	357,553		Não
nº outliers	-	-	0	72	controle	-0,268	0,099	0,2857	290,2744		Não
				77	controle	0,027	0,156	0,1583	9,8193		Não
				83	controle	-0,171	0,337	0,3779	333,0959		Não
				85	controle	-0,111	0,264	0,2864	337,1955		Não
				88	controle	-0,053	0,135	0,145	338,5654		Não
				91	controle	-0,3972	0,146	0,4232	290,1821		Não
				92	controle	0,056	-0,272	0,2777	168,3664		Não
				94	controle	0,034	0,071	0,0787	25,5885		Não
				95	controle	0,489	-0,017	0,4893	91,9911		Não
				98	controle	0,054	-0,049	0,0729	132,2208		Não

Validação para escala 1:1.500: Classe A

GeoPEC - Avaliação da Acurácia Posicional - [Acurácia Posicional - Decreto 89.817 / ET-CQDG]

Arquivo Entrada de dados Acurácia Posicional Amostragem Relatório Ajuda

Acurácia Posicional (Decreto 89.817 / ET-CQDG) - Planimetria

Escala de teste: 1/1500 Area de Estudo: 2,54 Unidades: ha

Nº Pts Total: 21
Nº Pts Excluídos do cálculo: 0

Distribuição Espacial | Teste de Normalidade | Tendência | Decreto 89.817 / ET-CQDG | Acurácia (Resumo Resultados)

Análise da Precisão

Decreto / ET-CQDG: **Classe A**

Classe A

Análise das tendências

T de Student: **Não Tendencioso**

Média direcional: **Não Tendencioso**

variância circular: **Não há Tendência**

Padrão de Dist. Espacial

Vizinho mais próximo:

1ª ordem: **Disperso**

2ª ordem: **Disperso**

3ª ordem: **Disperso**

ACURÁCIA

Produto Acurado para a Classe A na escala 1/1500

[Metodologia Santos et al. (2016)]

Teste de Normalidade: **Amostra Normal**

Estatísticas	Este	Noite	Posicional
nº pontos	21	21	21
média	-0,0306	0,0537	0,2055
desvio	0,1842	0,1546	0,1322
variância	0,034	0,024	0,017
RMS	0,1823	0,1601	0,2426
máximo	0,489	0,337	0,4893
mínimo	-0,3972	-0,272	0,0379
curtose	4,124	2,660	2,012
assimetria	0,633	-0,240	0,499
soma	0,679	0,478	0,350
nº outliers	-	-	0

Ponto	Descrição	Discrep. E(m)	Discrep. N(m)	Discrep. Resultante	Azimute	Excluir?	Outlier
101	controle	-0,116	0,032	0,1203	285,4222		Não
42	controle	-0,157	0,099	0,1856	302,2344		Não
45	controle	-0,036	0,012	0,0379	288,4349		Não
46	controle	-0,033	0,05	0,0599	326,5752		Não
48	controle	0,088	-0,021	0,0905	103,4218		Não
50	controle	-0,178	0,301	0,3497	329,4015		Não
51	controle	-0,003	0,05	0,0501	356,5664		Não
55	controle	0,161	0,015	0,1617	84,6772		Não
58	controle	-0,2	-0,199	0,2821	225,1436		Não
67	controle	-0,005	0,117	0,1171	357,553		Não
72	controle	-0,268	0,099	0,2857	290,2744		Não
77	controle	0,027	0,156	0,1583	9,8193		Não
83	controle	-0,171	0,337	0,3779	333,0959		Não
85	controle	-0,111	0,264	0,2864	337,1955		Não
88	controle	-0,053	0,135	0,145	338,5654		Não
91	controle	-0,3972	0,146	0,4232	290,1821		Não
92	controle	0,056	-0,272	0,2777	168,3664		Não
94	controle	0,034	0,071	0,0787	25,5885		Não
95	controle	0,489	-0,017	0,4893	91,9911		Não
98	controle	0,054	-0,049	0,0729	132,2208		Não

APÊNDICE B - PROCESSAMENTO DE DADOS GNSS



Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: 1315

Início: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2019/12/12 10:44:20,00
Fim: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2019/12/12 15:50:25,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	TRMR4-3 NONE
Órbitas dos satélites: ¹	FINAL
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s):	5,00
Sigma² da pseudodistância(m):	5,000
Sigma da portadora(m):	0,010
Altura da Antena³(m):	1,400
Ângulo de Elevação(graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância(m):	0,86 GPS 1,03 GLONASS
Resíduos da fase da portadora(cm):	0,82 GPS 0,85 GLONASS

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-25° 05' 46,1369"	-50° 02' 38,7882"	1.003,86	7224064.685	596386.483	-51
Na data do levantamento ⁵	-25° 05' 46,1293"	-50° 02' 38,7898"	1.003,86	7224064.919	596386.440	-51
Sigma(95%)⁶ (m)	0,001	0,004	0,005			
Modelo Geoidal	MAPGEO2015					
Ondulação Geoidal (m)	4,09					
Altitude Ortométrica (m)	999,77					

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,700	0,600	0,040	0,040
Após 2 horas	0,330	0,330	0,017	0,018
Após 4 horas	0,170	0,220	0,009	0,010
Após 6 horas	0,120	0,180	0,005	0,008

¹ Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS) ou do Natural Resources of Canada (NRCAN).

² O termo "Sigma" é referente ao desvio-padrão.

³ Distância Vertical do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

⁴ A coordenada oficial na data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita na data do levantamento, utilizando o modelo VEMOS em 2000.4.

⁵ A data de levantamento considerada é a data de início da sessão.

⁶ Este desvio-padrão representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.



Os resultados apresentados neste relatório dependem da qualidade dos dados enviados e do correto preenchimento das informações por parte do usuário.

Em caso de dúvidas, críticas ou sugestões contate: ibge@ibge.gov.br ou pelo telefone 0800-7218181.

Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCAN)

Dados do arquivo do projeto							
Nome: G:\TBC\GNSS2_\TBC-PPP\PPP-RKS.vce							
Descrição: Processamento de pontos para validação do MDT							
Programa: Trimble Business Center							
Sistema de coordenadas							
Datum: SIRGAS2000							
Zona: UTM zone 22S							
Relatório simplificado de processamento das linhas de base							
Observação	Solução	Prec. H	Prec. V	ΔX	ΔY	ΔZ	Satélites usados
		(Metro)	(Metro)	(Metro)	(Metro)	(Metro)	
BASE - 02253462	Fixo	0,006	0,007	-89,937	0,359	-168,226	GPS: 9
							GLONASS: 7
BASE - 33963462	Fixo	0,007	0,01	-61,459	23,424	-164,253	GPS: 10
							GLONASS: 0
BASE - 02253467	Fixo	0,004	0,009	-58,193	13,538	-137,712	GPS: 10
							GLONASS: 6
BASE - 33963465	Fixo	0,003	0,006	-49,575	24,141	-145,122	GPS: 10
							GLONASS: 8
BASE - 33963466	Fixo	0,005	0,013	-36,608	25,036	-124,943	GPS: 10
							GLONASS: 8
BASE - 33963468	Fixo	0,004	0,012	-16,997	35,793	-113,323	GPS: 9
							GLONASS: 8
BASE - 3396346A	Fixo	0,004	0,013	-12,554	26,469	-86,8	GPS: 8
							GLONASS: 7
BASE - 3396346B	Fixo	0,006	0,017	-4,594	37,058	-94,365	GPS: 8
							GLONASS: 7
BASE - 0225346D	Fixo	0,004	0,013	-42,605	3,83	-91,241	GPS: 8
							GLONASS: 5
BASE - 0225346F	Fixo	0,004	0,01	-9,799	16,272	-59,488	GPS: 8
							GLONASS: 5
BASE - 3396346F	Fixo	0,005	0,012	19,176	39,279	-55,864	GPS: 8
							GLONASS: 5
BASE - 0225346I	Fixo	0,004	0,007	0,796	9,892	-23,637	GPS: 9
							GLONASS: 5
BASE - 3396346I	Fixo	0,003	0,004	-158,829	-94,096	-110,62	GPS: 7
							GLONASS: 4
BASE - 0225346L	Fixo	0,006	0,012	-177,306	-	123,001	-89,191
							GPS: 7
BASE - 0225346M	Fixo	0,015	0,034	-174,15	-	133,995	-63,643
							GPS: 7
BASE - 0225346O	Fixo	0,006	0,016	-149,003	-115,22	-55,576	GPS: 6
							GLONASS: 5
BASE - 3396346R	Fixo	0,006	0,014	-97,502	-76,393	-33,423	GPS: 7
							GLONASS: 5
BASE - 0225346S	Fixo	0,005	0,011	-119,507	-	104,264	-22,675
							GPS: 7
BASE - 0225346V	Fixo	0,007	0,011	-104,817	-98,145	-7,387	GPS: 8
							GLONASS: 6

Estilo de processamento	
Máscara de elevação:	10°00'00,0"
Processamento automático:	Sim
Iniciar numeração de ID automático:	AUTO0001
Vetores contínuos:	Não
Gerar resíduos:	Sim
Modelo da antena:	R4-3 internal
Tipo de efemérides:	Automático
Frequência:	Frequência dupla (L1, L2)
PDOP Máximo:	7
Número mínimo de satélites	10
Efeméride usada:	Transmissão
Intervalo de processamento:	5 segundos
Forçar flutuação:	Não
Tipo de processamento de GIS:	Processamento de portadora e código automático

Critérios de aceitação		
Componente do vetor	Valor 	Falha 
Precisão horizontal >	0,030 m + 1,000 ppm	0,050 m + 1,000 ppm
Precisão vertical >	0,035 m + 1,000 ppm	0,050 m + 1,000 ppm