

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

ALISON ANDRÉ DOMINGUES TEIXEIRA

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA RADIOMÉTRICA DE IMAGEM DOS SENSORES
SEQUOIA E MSI NA CULTURA DA AVEIA PRETA**

PORTO ALEGRE

2019

ALISON ANDRÉ DOMINGUES TEIXEIRA

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA RADIOMÉTRICA DE IMAGEM DOS SENSORES
SEQUOIA E MSI NA CULTURA DE AVEIA PRETA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Área de Concentração: Sensoriamento Remoto Aplicado.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Wilson Mendes Jr.

PORTO ALEGRE

2019

ALISON ANDRÉ DOMINGUES TEIXEIRA

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA RADIOMÉTRICA DE IMAGEM DOS
SENSORES SEQUOIA E MSI NA CULTURA DE AVEIA PRETA**

BANCA EXAMINADORA

PROF. DR. CLÁUDIO WILSON MENDES JUNIOR (ORIENTADOR) - UFRGS

PROF. DR. MARCOS WELLAUSEN DIAS DE FREITAS - UFRGS

PROF. DR. CHRISTIAN BREDEMEIER - UFRGS

PROF. DR. JEAN MARCEL DE ALMEIDA ESPINOZA - IFRS

APROVADO EM: ____ DE _____ DE 2019

*Dedico este trabalho a minha mãe
Neuza Domingues Teixeira
e meu pai
Genair do Santos Porto*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Cláudio Wilson Mendes Jr., pela orientação, paciência, dedicação, confiança e principalmente pela amizade;

ao Prof. Dr. Christian Bredemeier pela parceria construída, apoio e recursos fornecidos, sem os quais este estudo não teria sido possível; e ao Grupo de pesquisadores e apoiadores do Departamento de Plantas de Lavoura, os quais também demandaram certo tempo e esforço na implementação do projeto e coleta de dados;

ao Departamento de Geodésia da UFRGS, pelo empréstimo dos receptores GNSS, bem como dos softwares usados no processamento dos dados. Ao técnico desse departamento, Geólogo Msc. Robson do Santos Aquino, por ter executado o levantamento e o pós-processamento dos dados GNSS.

à UERGS, pelo empréstimo do sensor Parrot Sequoia e do VANT Matrice 100;

ao Eng. de Computação Myrair Raul Quadros de Souza, por ter executado o voo com o Sequoia/Matrice 100, e ao Eng. Elétrico Dr. Marcelo Negreiros, por ter contribuído na calibração radiométrica das imagens do Sequoia.

aos meus pais Neuza e Genair, e meus irmãos Samuel e Daniel por toda confiança, apoio e incentivo;

à todas as pessoas que apoiam e continuarão apoiando a causa da universidade pública, gratuita e de qualidade;

aos meus familiares, amigos e todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, me inspiraram e incentivaram nesta jornada.

RESUMO

Nas medidas de reflectância espectral da cobertura e uso do solo e para o cálculo de índices de vegetação são necessárias correções geométricas e radiométricas de imagens obtidas por sensores remotos acoplados a satélites e até mesmo a Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). O objetivo desta dissertação foi avaliar a acurácia de dados de reflectância espectral e de Índices de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) e *Red Edge* (NDRE) derivados de imagens obtidas por câmera Parrot Sequoia acoplada a um quadricóptero DJI Matrice 100, e de imagens do sensor MSI-Sentinel-2, em duas lavouras de aveia preta (*Avena strigosa Schrec*) na fase 60 do estágio fenológico, localizadas no município de Eldorado do Sul (RS - Brasil). Foram processados ortofotomosaicos (resolução espacial de 9,4 cm) sem e com correções radiométricas (com uso de painel de calibração de reflectância Mapir V2 e/ou com uso do sensor de irradiância solar do sensor Sequoia), e a acurácia radiométrica destas imagens foi avaliada a partir de dados de reflectância (178 amostras) coletados por um sensor Crop Circle ACS-430, no mesmo dia do levantamento com VANT (04/10/2018). O ortofotomosaico multiespectral com maior acurácia radiométrica foi o corrigido a partir do subpainel *Light Gray*. O Erro Absoluto Médio (EAM) das bandas e índices espectrais desse ortofotomosaico foi o seguinte: banda Red = $0,02 \pm 0,01$; *Red Edge* = $0,3 \pm 0,2$; NIR = $0,04 \pm 0,03$; NDVI = $0,09 \pm 0,05$; NDRE = $0,02 \pm 0,02$. Este ortofotomosaico foi usado para avaliar a acurácia radiométrica de uma imagem (184 pixels) do sensor MSI-Sentinel 2 (05/10/2018), sem correção atmosférica (dados ao topo da atmosfera - TOA) e com correção atmosférica (dados de reflectância superficial - BOA) pelos métodos *Dark Object Subtraction* (DOS) e Sen2Cor. Os maiores valores de EAM ocorreram na imagem da banda Red (máximo de $0,25 \pm 0,01$) com relação às outras bandas e índices espectrais analisados. Esse erro poderia ser explicado pela sensibilidade ao pigmento clorofila B em 642 nm, que pode ser detectado somente na banda Red do sensor Sequoia e não pelo sensor MSI. O valor máximo de EAM da imagem *Red Edge* ($0,08 \pm 0,01$) e NIR ($0,10 \pm 0,01$) foram obtidos com a imagem Sen2Cor. Os valores de NDVI mais acurados (EAM = $0,02 \pm 0,01$) foram os da imagem de reflectância TOA, ao passo para os valores de NDRE foram os da imagem Sen2Cor (EAM = $0,03 \pm 0,01$). Esta última é um produto nível 2A fornecido pela Agência Espacial Européia (ESA) e neste experimento com aveia preta a imagem NDVI apresentou EAM máximo de $0,08 \pm 0,02$.

Palavras-chave: NDVI, NDRE, Sensor Sequoia, Sentinel 2, Correção radiométrica.

ABSTRACT

For spectral reflectance measurements of land cover and land use and for the calculation of vegetation indices it is required geometric and radiometric corrections of images acquired by remote sensors coupled to satellites and even to Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). The objective of this dissertation was to evaluate the accuracy of spectral reflectance and vegetation indexes (Normalized Difference - NDVI and Red Edge - NDRE) data derived from a Parrot Sequoia camera coupled to a DJI Matrice 100 quadcopter, and from images of the MSI-Sentinel-2 sensor, in two *Black* oat (*Avena strigosa* Schrec) crops at phase 60 of its phenological stage, located in Eldorado do Sul county (RS - Brazil). Orthophotomosaics (spatial resolution of 9.4 cm) were processed without and with radiometric corrections (using the Mapir V2 reflectance calibration ground target and/or using the Sequoia solar irradiance sensor), and the radiometric accuracy of these images was assessed from reflectance data (178 samples) collected by a Crop Circle ACS-430 sensor on the same day as the RPAS survey (10/04/2018). The multispectral orthophotomosaic with the highest radiometric accuracy was corrected from the *Light Gray* reference panel. The Mean Absolute Error (MAE) of the bands and spectral indices of this orthophotomosaic was as follows: Red band = 0.02 ± 0.01 ; Red Edge = 0.3 ± 0.2 ; NIR = 0.04 ± 0.03 ; NDVI = 0.09 ± 0.05 ; NDRE = 0.02 ± 0.02 . This orthophotomosaic was used to evaluate the radiometric accuracy of an image (184 pixels) of MSI-Sentinel 2 (10/05/2018), with no atmospheric correction (Top of Atmosphere - TOA) and with atmospheric correction (Bottom of Atmosphere - BOA) by the Dark Object Subtraction (DOS) and Sen2Cor methods. The highest values of MAE occurred in the Red band image (maximum of 0.25 ± 0.01) in relation to the other bands and spectral indices analyzed. This error could be explained by the sensitivity to 642 nm chlorophyll B pigment, which can be detected only in the Red band of the Sequoia sensor and not by the MSI sensor. The maximum MAE value of the Red Edge (0.08 ± 0.01) and NIR (0.10 ± 0.01) bands were obtained for the Sen2Cor image. The most accurate NDVI values (EAM = 0.02 ± 0.01) were those of the TOA reflectance image, while the NDRE values were for the Sen2Cor image (EAM = 0.03 ± 0.01). The latter is a level 2A product provided by the European Space Agency (ESA) and in this experiment with *Black* oats the NDVI image presented maximum EAM of 0.08 ± 0.02 .

Keywords: NDVI, NDRE, Sequoia Sensor, Sentinel 2, Radiometric Correction.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
SUMÁRIO.....	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DE TABELAS.....	10
1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO GERAL	13
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO.....	14
3.1 CARACTERÍSTICAS DA CULTURA DA AVEIA PRETA.....	14
3.2 APLICAÇÃO DO NDVI E NDRE NA AGRICULTURA DE PRECISÃO	16
3.3 SENSOR CROP CIRCLE	19
3.4 SENSOR PARROT SEQUOIA – QUADRICÓPTERO MATRICE 100	20
3.5. PAINEL DE CALIBRAÇÃO DE REFLECTÂNCIA MAPIR	23
3.6. SENTINEL 2 – MSI	24
3.6.1 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO	26
3.6.2 <i>Método Dark Object Subtraction</i>	27
3.6.3 <i>Método SEN2COR</i>	28
4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	30
4.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
4.2 MÉTODOS	32
4.2.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS EM NÍVEL TERRESTRE E SUBORBITAL	33
4.2.1.1 <i>Processamento geométrico das fotografias aéreas</i>	34
4.2.1.2 <i>Calibração radiométrica das fotografias aéreas</i>	35
4.2.1.3 <i>Validação dos ortofotomosaicos com dados do Crop Circle</i>	36
4.2.2. <i>Processamento e avaliação das imagens MSI-Sentinel 2</i>	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
REFERÊNCIAS	60

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Escala fenológica do estádio da aveia.	14
Figura 2 – Crop Circle ACS-430.....	19
Figura 3 – Sensor Parrot Sequoia.....	20
Figura 4- Quadricóptero Matrice 100 com sensor Parrot Sequoia.	22
Figura 5 – Painel de calibração de reflectância Mapir V2 usado neste estudo	23
Figura 6 – Ilustração do Sensor MSI – Sentinel 2.....	24
Figura 7 - Localização da área de estudo sobre composição colorida RGB321 de imagem Planetscope (04/10/2018).	31
Figura 8 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos deste estudo.....	32
Figura 9 - Distribuição dos pontos de coleta do sensor Crop Circle sobre composição colorida RGB 432 dos ortofotomosaicos da câmera Sequoia.....	40
Figura 10 - Erro absoluto médio e desvio-padrão, e Erro relativo médio dos ortofotomosaicos obtidos a partir de diferentes referências de calibração radiométrica na área A.....	42
Figura 11 - Erro absoluto médio e desvio-padrão, e Erro relativo médio dos ortofotomosaicos obtidos a partir de diferentes referências de calibração radiométrica na área B.....	43
Figura 12 – Distribuição e magnitude erros absolutos dos ortofotomosaicos NDVI e NDRE. ..	47
Figura 13 – Relações entre os valores de NDVI e NDRE mensurados a partir do sensor Crop Circle e do ortofotomosaico gerado com dados do subpainel <i>Light Gray</i> do painel de calibração de reflectância Mapir V2.....	48
Figura 14 – (A) e (B): Malha de pixels MSI-Sentinel 2 (bandas VNIR) sobre o ortofotomosaicos da câmera Sequoia (composição colorida 432). (C) e (D): mesma malha de pixels sobre composição coloria RGB864 do sensor MSI-Sentinel 2.	50
Figura 15 - Erro absoluto médio e desvio-padrão, e Erro relativo médio das imagens MSI-Sentinel 2 da área A.....	51
Figura 16 - Erro absoluto médio e desvio-padrão, e Erro relativo médio das imagens MSI-Sentinel 2 da área B.....	52
Figura 17 - Distribuição e magnitude dos erros absolutos dos NDVI e NDRE, gerados a partir da correção atmosférica Sen2Cor.	54
Figura 18 - Relações entre os valores de NDVI e NDRE mensurados a partir do ortofotomosaico gerado com dados do subpainel <i>Light Gray</i> do painel de calibração de reflectância Mapir em relação aos obtidos das imagens Sentinel 2 MSI, calibrados pelo algoritimos Sen2Cor.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características do Sensor Parrot Sequoia (PARROT, 2018a).....	20
Tabela 2. Características das bandas espectrais do sensor MSI - Sentinel 2 (ESA, 2015a).....	25
Tabela 3. Diferentes níveis de processamento nos dados MSI, segundo BAILLARIN (2012)..	25
Tabela 4 – Dados da estação meteorológica da EEA do início de outubro de 2018.....	30

1. INTRODUÇÃO

Em meados da década de 1990, a Agricultura de Precisão (AP) estava focada na utilização de máquinas dotadas de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) e na utilização de mapas de produtividade para auxiliar na tomada de decisões (INAMASU *et al.*, 2011). Conforme as tecnologias de aquisição de dados de Sensoriamento Remoto (SR) foram se desenvolvendo, esta realidade foi ampliada com uma gama de possibilidades. A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) na agricultura é um exemplo disto, uma vez que a utilização destas plataformas vêm crescendo no Brasil no século XXI (CASTRO JORGE; INAMASU, 2014). De acordo com SANTOS (2019), o uso do Sensoriamento Remoto na AP tem como objetivo adquirir informações precisas da plantação, de forma a ajudar o agricultor na tomada de decisões, como por exemplo na aplicação de insumos em taxas variáveis nas lavouras, para o uso mais otimizado desses recursos. O Sensoriamento Remoto é um conjunto de técnicas que possibilita a obtenção de informações sobre alvos da superfície terrestre, através da interação da radiação eletromagnética (REM) com os mesmos, sendo este uma importante ferramenta na AP (SHIRATSUCHI SHOZO *et al.*, 2014)

Entre as possibilidades de aplicação do Sensoriamento Remoto na AP, destacam-se os índices de vegetação (IV), que podem ser usados para avaliar características biofísicas da planta, o que vem a ser um importante aliado na AP (PEREIRA *et al.*, 2016). Vários trabalhos científicos já têm demonstrado a eficácia do estudo da vegetação através de IVs. Dentre estes, um dos mais utilizados é o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI). Este IV é calculado a partir da razão entre a banda espectral do vermelho (Red) e do Infravermelho próximo (NIR), sendo o mesmo influenciado pelas características biofísicas da planta, que pode ser utilizado para analisar estresses nas plantas, incluindo a deficiência de nitrogênio (TURRA, 2016). Outro IV que vem ganhando destaque é o Índice de Borda Vermelha por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Red Edge Index* - NDRE), que é dado pela razão entre a banda espectral do *Red Edge* (RE) e a NIR, que é mais sensível a variações de clorofila na planta do que o NDVI e sofre menos com o problema de saturação em vegetação com elevada biomassa.

Hoje em dia dispomos de vários meios para a aquisição de dados de Sensoriamento Remoto, podendo ser tanto por sensores a nível orbital, quanto por sensores aéreos (nível suborbital) ou até mesmo por sensores a nível terrestre

(SHIRATSUCHI SHOZO *et al.*, 2014), onde a escolha correta do sensor para um determinado tipo de estudo vai depender única e exclusivamente da sua aplicação e da precisão requerida (ABREU; COUTINHO, 2014). Em função disto, muitas vezes a escolha e o tratamento desse dado é subestimado como, por exemplo, a correção atmosférica para os dados de imagens de satélites, o que pode resultar em um produto errôneo ou pouco preciso radiometricamente.

Com o intuito de facilitar o trabalho dos usuários, tem sido cada vez mais comum os dados de sensoriamento remoto orbital serem disponibilizados já pré-processados. Esses procedimentos são realizados basicamente para remover ou corrigir os erros e as distorções que pode ocorrer durante a aquisição das imagens, tais como: erros instrumentais (ruídos espúrios), geometria de imageamento e distorções atmosféricas (MENESES; ALMEIDA, 2012). O sensor MSI-Sentinel 2 é um exemplo disto, já que as imagens passam por diferentes níveis de pré-processamento antes de serem disponibilizadas ao usuário.

Devido à popularização dos VANTs nos tempos atuais, é cada vez mais comum a utilização destas plataformas para a coleta de informações da vegetação. Na literatura, vários trabalhos exploram o potencial do uso de VANTS para a aquisição de dados e fornecer informações precisas, como no caso da agricultura de precisão (AP), contudo pouco se fala da necessidade ou não do uso de correções radiométricas destes dados.

Sendo assim, ao trabalhar com radiometria espectral da planta, por meio de sensores a bordo de plataformas em nível suborbital, tais como os VANTs, até que ponto as nuvens e variações da geometria de iluminação e visada do sensor podem degradar a qualidade dos dados radiométricos? Se não forem feitas essas correções radiométricas para dados suborbitais, ou correção atmosférica para os dados orbitais, os erros em bandas espectrais, no NDVI e NDRE serão significativos? Diante dessa questão, estudos deveriam ser realizados para avaliar os resultados obtidos sem e com o uso de diferentes procedimentos de calibração, para avaliar a acurácia da reflectância de imagens de diferentes bandas espectrais e de índices de vegetação derivados destas.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar a acurácia radiométrica de dados obtidos por sensor multiespectral acoplado a VANT e processados por diferentes métodos de correção radiométrica a partir de dados de sensor terrestre e usar o resultado mais acurado em nível suborbital para avaliar a acurácia radiométrica de imagens do sensor *MultiSpectral Imager* (MSI - Sentinel 2), processadas por diferentes modelos de correção atmosférica, na cultura da Aveia Preta (*Avena strigosa Schrec*).

2.1 Objetivos Específicos

- Mensurar a reflectância de lavouras de Aveia Preta nas bandas espectrais do Red, RE e NIR, o NDVI e o NDRE, a partir de sensores terrestre e suborbital;

- Validar as medidas de reflectância dessas bandas e índices espectrais, obtidas por sensor acoplado a VANT, com as medidas de um sensor terrestre, avaliando a precisão das imagens suborbitais sem e com calibração radiométrica, com uso de sensor de irradiância solar e/ou de painel de calibração de reflectância.

- Usar o ortofotomosaico suborbital mais acurado radiometricamente para avaliar os erros dessa grandeza em imagens MSI-Sentinel 2 das bandas Red, RE e NIR, e dos índices NDVI e NDRE, com dados ao topo da atmosfera (TOA) e com dados de reflectância superficial (BOA), obtidas pelos métodos *Dark Object Subtraction* (DOS) e Sen2Cor.

3. REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO

3.1 Características da Cultura da Aveia Preta

A aveia (*Avena ssp*) é uma importante espécie de cultura de inverno, comumente utilizada como rotação entre safras, e tem o papel de proteger o solo, evitando a erosão (BAIER; FLOSS; AUDE, 1988). Considerada como uma gramínea forrageira de inverno, a aveia é amplamente utilizada para pastejo ou conservação em forma de feno ou silagem, e até mesmo para a produção de grãos (FONTANELI; PEREIRA, 1982). Outras utilizações para este cereal que se destacam nos dias de hoje, estão na produção de grãos para o consumo humano e/ou como matéria-prima em indústrias de cosméticos e até mesmo fornecendo insumos para indústrias químicas, além de servir como adubação verde e produção de palhada para a cobertura do solo (MORI; FONTANELI; SANTOS, 2012).

Como características do desenvolvimento da aveia, de acordo com a escala de ZADOKS (1974), são utilizados os números de 00 a 99 para designar todas as fases de crescimento e desenvolvimento dessa planta (Figura 1).

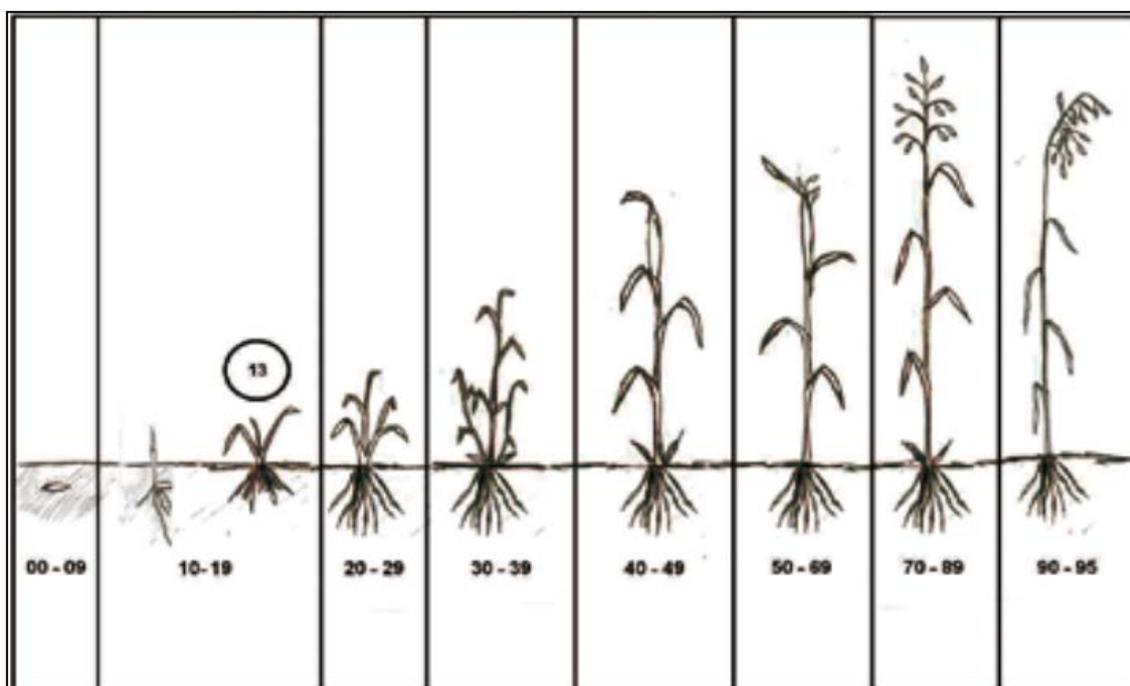


Figura 1- Escala fenológica do estágio da aveia.

Fonte: Adaptado de ZADOKS (1974).

A primeira fase consiste na germinação (0-09), onde fatores como umidade e boa estrutura do solo no momento da sementeira são muito importantes para a correta germinação de sementes e o conhecimento da quantidade das sementes para realização da sementeira é um fator importante para evitar prejuízos (LUCHE *et al.*, 2014). Em seguida vem a fase do crescimento de plântula e afilhamento (10-29), onde é desenvolvido o número de afilhos, normalmente com a presença de três a quatro folhas abertas por planta. De acordo com LUCHE (2014), o número de afilhos é determinado principalmente entre as fases 13 – 14, com a presença de três a quatro folhas abertas por planta. Esse autor salienta que o período de manejo é muito importante para o bom crescimento da planta, principalmente a adubação nitrogenada, uma vez que o nitrogênio estimula a formação dos afilhos. A fase seguinte do desenvolvimento é a alongação e emborrachamento (30-49): a alongação é caracterizada pela extensão de entrenós e elevação do meristema apical, já o emborrachamento é a fase que antecede o florescimento. A fase 50-69 corresponde ao período de florescimento (emergência de panículas e antes), que compreende uma etapa fundamental no desenvolvimento da planta. O enchimento de grãos (grão leitoso e desenvolvimento de massa de grão) ocorre na fase 70-89, e é caracterizada pelo acúmulo de açúcares no endosperma dos grãos. A última fase compreende o período de maturação da aveia (90-99). Mais detalhes a respeito do desenvolvimento da Aveia estão disponíveis em LUCHE (2014).

Na literatura podem ser encontradas inúmeras espécies de aveia, todavia, no Brasil são cultivadas principalmente as espécies que se dividem em aveia-preta (*Avena strigosa Schrec*), aveia-branca (*Avena sativa L*) e aveia-amarela (*Avena bysantina L*). Essas distintas espécies de aveia possuem finalidades e características diferentes, onde a escolha do cultivo vai depender do objetivo. As aveias branca e amarela são mais indicadas para a produção de forragem verde, além de possibilitar a melhor extração de grãos do rebrote; a aveia branca, por apresentar alto teor de proteínas e fibras solúveis, é o cereal também utilizado para a alimentação humana (BARROS, 2013); já a aveia preta tem grãos que não possuem valor industrial, porém é altamente recomendada para a pastagem, pois apresenta alta produção de massa verde, sendo menos vulnerável a doenças, tendo boa resistência ao pisoteio, além de ser mais resistente à seca e menos exigente quanto à fertilidade do solo (BAIER; FLOSS; AUDE, 1988).

Recomenda-se o plantio da aveia preta a partir de março, em regiões mais quentes, e até o mês de junho, em regiões mais frias. Essa planta apresenta um ciclo de 100 a 130

dias (SÁ, 1995). Após a germinação, a aveia preta apresenta crescimento inicial rápido, com elevadas produções de biomassa, o que favorece para o primeiro corte, que pode ocorrer em 40 a 60 dias após a germinação, que é o período em que normalmente a planta atinge entre 30 cm a 40 cm de altura, porém o rendimento vai diminuindo nos cortes subsequentes, ou seja, depois da recuperação do vigor após o primeiro corte, o crescimento e a produção de biomassa subsequente serão menores do que o primeiro (ANDRADE, 1992). Devido a essas características, a aveia preta é uma ótima opção para compor o sistema de sustentabilidade de produção, como o sistema de integração lavoura-pecuária. Devido as suas características, destacam-se o crescimento vigoroso e a tolerância à acidez nociva do solo (BARROS, 2013). FONTANELI *et al.* (1991) observaram que a aveia preta tem alta produção de massa seca, o que segundo BARROS (2013) caracteriza-se como alto potencial na produção de forragem, na forma de pastagem hibernal ou mesmo como forragem conservada na forma de ensilagem e feno.

3.2 Aplicação do NDVI e NDRE na Agricultura de Precisão

A resposta espectral da vegetação está diretamente relacionada com as propriedades da superfície e com a estrutura celular das folhas (mesófilo), sendo condicionadas também a concentrações e distribuições de componentes bioquímicos como os pigmentos fotossintéticos (OGAYA; PEÑUELAS, 2003). Desta forma, a REM interage de maneira distinta em cada uma das bandas espectrais. Como exemplo, os processos de absorção da REM nos comprimentos de onda do visível, pelos pigmentos da folha, que atuam nos processos de fotossíntese e fotoconversão. Estas absorções dependem das características da planta, e tem picos de absorção em faixas distintas no espectro eletromagnético: por exemplo, a absorção ocasionada pela clorofila A na banda espectral Red ocorre nos comprimentos de onda de 410 nm, 630nm e 662nm; já a clorofila B tem seus picos de absorção em 453 nm e 642 nm (GROSS, 1991). Na banda espectral do RedEdge ocorre aumento da reflectância da vegetação. Já na banda espectral do NIR a característica principal de interação da REM com a vegetação verde sadia é a alta reflectância e baixa absorção quando comparado ao visível, sendo esses processos ocasionados pelo espalhamento da REM no mesófilo paliçádico (onde estão

os cloroplastos e pigmentos fotossintetizantes) e mesófilo esponjoso (caracterizado por espaços intercelulares, com gases e água) (PONZONI, 2001).

As medidas de reflectância de duas ou mais bandas espectrais podem ser usadas no cálculo de IVs. Além de estarem relacionados a parâmetros biofísicos da planta (PEREIRA et al., 2016), os IVs podem ser usados no monitoramento de variações espaciais e temporais das atividades fotossintéticas da vegetação, ajudando na sua detecção e avaliação (MIURA; 2006).

Existe na literatura uma grande variedade de IVs, porém o que mais se destaca é o NDVI, proposto inicialmente por Rouse *et al.* (1973), com o objetivo principal de se estimar a biomassa vegetal. O NDVI pode ser obtido pelo cálculo da diferença normalizada da reflectância da banda NIR com a da banda Red (Eq. 1).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (Eq. 1)$$

Como resultado dessa equação, o NDVI pode apresentar valores que variam de -1 a +1, onde os valores negativos (mais próximos a -1) podem ser associados a alvos como nuvens, corpos d'água ou a alvos com a presença de água, enquanto que os valores próximos de zero estão relacionados com o solo exposto (ausência de vegetação); por outro lado, os valores mais elevados de NDVI (próximos a +1) correspondem à resposta espectral da vegetação, e correlacionam-se com o estado da densidade da vegetação, seu desenvolvimento e vigor (LIU, 2007).

Outro IV que vem ganhando destaque na literatura é o NDRE, proposto por BARNES et al. (2000), cuja aritmética é semelhante ao do NDVI, com a substituição da banda espectral Red pela do *Red Edge* (RE), conforme descrito na Equação 2:

$$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE} \quad (Eq. 2)$$

O NDRE explora o potencial do *Red Edge*, que é uma banda espectral específica para análise de vegetação e/ou uso e ocupação do solo, que no espectro eletromagnético é situada na região de transição do visível (Red) para o não visível (NIR), entre 690 a 720nm, que é uma região do espectro eletromagnético caracterizada pela mudança abrupta do comportamento da curva de absorção da vegetação, ocasionada pela

absorção da clorofila e espalhamento interno da REM, o que torna essa banda espectral sensível ao estresse da vegetação e às mudanças do teor de clorofila total na planta (JENSEN, 2009).

A acurácia dos IVs está diretamente relacionada com características do sensor utilizado, como as resoluções espacial (relacionada com o campo de visada instantâneo – IFOV do sensor), espectral (quantidade de bandas espectrais e a largura ou amplitude de cada uma destas bandas), radiométrica (sensibilidade dos detetores), da qualidade dos sensores utilizados (Ex: relação sinal-ruído dos detetores, sistema de lentes, etc.), do tipo de sensor (ativo ou passivo) e com o nível de aquisição dos dados (terrestre, suborbital e orbital), nos quais são diferentes os efeitos de geometria de visada e de iluminação, bem como dos constituintes atmosféricos (gases, vapor d'água, partículas em suspensão e aerossóis).

Há poucos os artigos que correlacionam a resposta espectral do NDVI calculado por sensores orbitais em relação a dados de sensor terrestre, tal como o de HAMADA (2000). GROHS *et al* (2009) desenvolveram um modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada, correlacionando o NDVI com a biomassa seca acumulada. Sensores terrestres foram utilizados no cálculo do NDVI na cultura do trigo, como por exemplo, o GreenSeeker e FieldSpec 4, utilizados por GARCIA (2015), que demonstrou por meio de perfis temporais de NDVI, que as variedades de trigo têm comportamentos diferentes no início e no final da cultura, os quais se devem principalmente ao ciclo fenológico de cada cultivar. Já a aplicação do NDVI na cultura do trigo por meio de sensores suborbitais, como por exemplo com os VANTs, ainda não é uma técnica muito disseminada, tal como para a soja.

MEROTTO Jr. *et al.* (2012) fizeram medições de NDVI com o Greenseeker em lavouras de soja, para detectar plantas daninhas. O estudo de MICHELS *et al.* (2019) objetivou testar o uso de imagens digitais obtidas por VANT, para determinar a cobertura foliar da soja correlacionado com o NDVI coletado a campo com o sensor Greenseeker. Já para o NDRE, trabalhos como o apresentado por SIMIC MILAS *et al.* (2018), que avaliou a importância o índice de área foliar (IAF) no mapeamento da clorofila na cultura do milho, por meio do NDRE através de imagens adquiridas por VANT. Utilizando sensores a nível terrestre, CAO *et al.* (2018) avalia o desempenho de diferentes sensores de dossel Crop Circle ACS de diferentes modelos, na estimativa do status de nitrogênio do trigo de inverno, em diferentes alturas de medição e estágios de crescimento da planta.

Sobre a aveia, trabalhos como o do DOUMIT et al. (2017) demonstram o uso e o potencial de diferentes índices de vegetação, incluído o NDVI e NDRE para a classificação de imagens Rapid Eye e tipos de culturas na cultura da soja, cevada, aveia, trigo entre outros. DAMIAN et al. (2020) Utilizou de sereis temporais de NDVI para delimitar zonas de manejo em três áreas no Rio Grande do Sul, juntamente com mapas de produtividade das culturas: Aveia branca, trigo, soja e milho.

3.3 Sensor Crop Circle

O Crop Circle ACS-430 (Figura 2) é um sensor de dossel desenvolvido pela empresa *Holland Scientific*. Diferente da câmera multiespectral Sequoia, o Crop Circle é um sensor ativo, pois emite sua própria fonte luminosa a partir de um LED (*Light Emitting Diode*), com uma frequência de emissão de 40.000 Hz, tendo um campo de visada de 30° x 14°. Esse sensor capta a reflectância dos alvos por meio de três fotodetectores, situados nas seguintes bandas espectrais: Red (660 – 680 nm), RE (720 – 740 nm) e NIR (770 – 790 nm) (SCIENTIFIC, 2012). A cada medição são apresentados os valores de reflectância nessas bandas espectrais, assim como valores de NDVI e NDRE dos alvos no seu campo de visada instantâneo (IFOV). Os dados coletados pelo Crop Circle são armazenados em um cartão SD, no formato *Comma-Separated Values* (CSV), e podem ser tratados em planilhas eletrônicas.

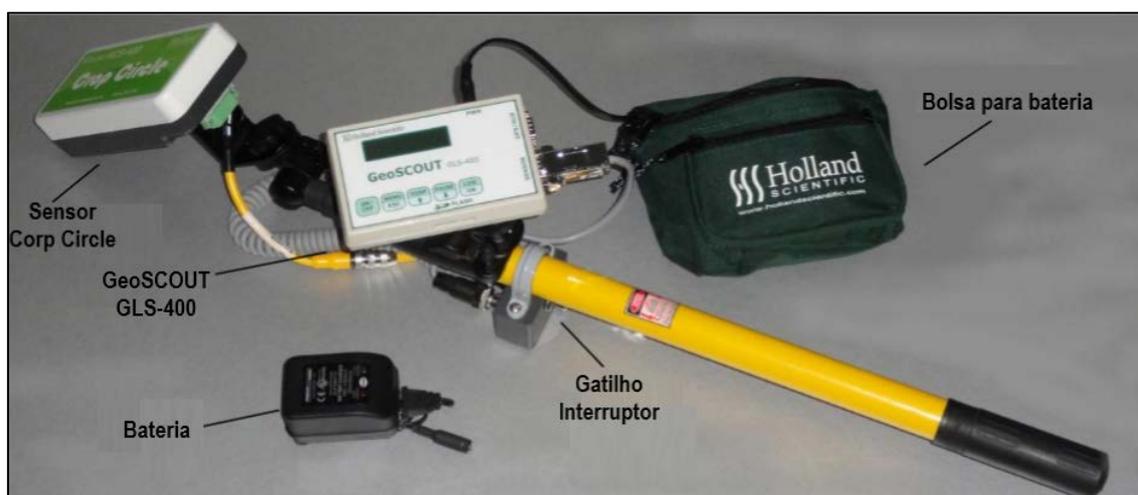


Figura 2 – Crop Circle ACS-430

Fonte: Adaptado de SCIENTIFIC (2012).

3.4 Sensor Parrot Sequoia – Quadricóptero Matrice 100

O Parrot Sequoia (Figura 3) é um sensor multiespectral, desenvolvido por uma parceria entre as empresas *Parrot* e *Micasense*. O sensor Sequoia é capaz de adquirir imagens em quatro bandas espectrais distintas, sendo duas no comprimento de onda do visível (Red e Green), uma na região do RE e outra no NIR. As imagens dessas quatro bandas têm resolução de 1,2 megapixels e possuem 16 bits de resolução radiométrica. O Sequoia possui também uma câmera RGB integrada, capaz de obter imagens com resolução espacial de 16 megapixels (Tabela 1).

Tabela 1. Características do Sensor Parrot Sequoia (PARROT, 2018a).

Resolução da câmera multiespectral	1.2MP
Tamanho da imagem	1280 X 960 pixels
Ângulo Focal	3,98 mm
BANDAS ESPECTRAIS	Green 530 - 570 nm
	Red 640 - 680 nm
	Red Edge 730 - 740 nm
	NIR 770 - 810 nm
Resolução da câmera RGB	16 MP

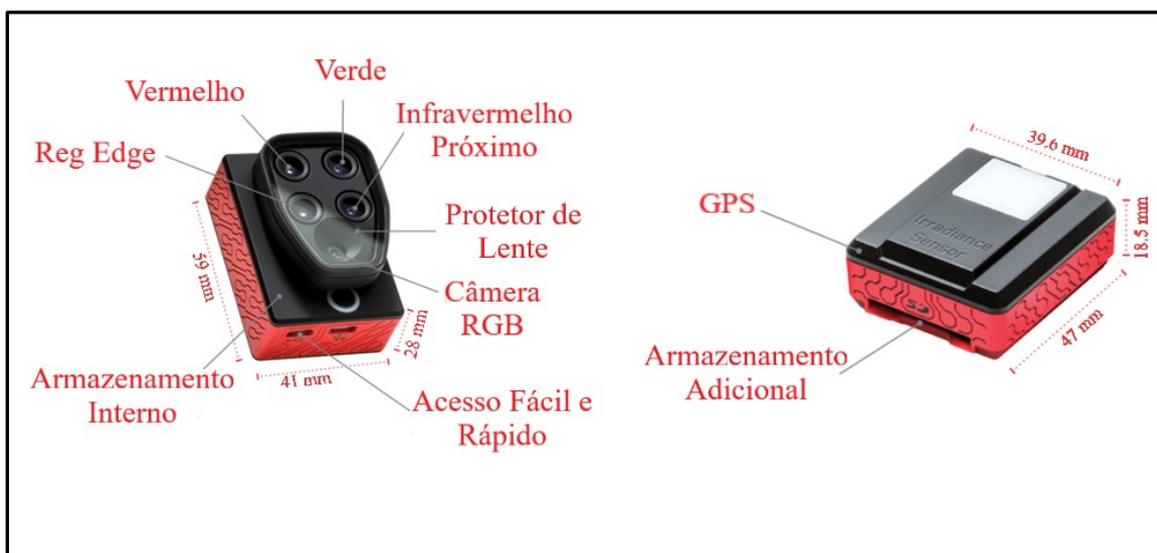


Figura 3 – Sensor Parrot Sequoia

Fonte: Adaptado de SIS (2018).

A câmara multiespectral do Sequoia possui campo de visada horizontal (HFOV) de 61,9°, campo de visada vertical (VFOV) de 48,5° e campo de visada diagonal (DFOV) de 73,7° (PARROT, 2018b). Outra característica do sensor Sequoia é que o mesmo possui um sensor solar (*Sunshine Sensor* - SS), que pode ser utilizado para registrar a irradiância solar no momento da aquisição das imagens das quatro bandas espectrais. As informações coletadas pelo SS são adicionadas aos metadados de cada imagem (Geotag) e podem ser utilizadas para sua posterior correção radiométrica em softwares de processamento de imagens de VANTs, como por exemplo o Agisoft Photoscan e o DJI Pixel 4D.

O sensor multiespectral Sequoia pode ser acoplado a um VANT do tipo asa fixa (*e.g.*, Sensefly modelo Ebee) ou multirrotor (*e.g.*, DJI modelo Phantom 4). Os VANTs de asa fixa geralmente têm a vantagem de cobrir áreas maiores do que os multirrotos. No caso deste estudo, foi utilizado um VANT desenvolvido pela empresa chinesa DJI, modelo Matrice 100, que é um quadricóptero indicado para fins profissionais. Construído em fibra de carbono, que é um material resistente e com baixo peso, o Matrice proporciona uma solução prática com variáveis técnicas tanto para sensores quanto para usos diversificados, possibilitando carregar até 2,2 kg em equipamentos e ou acessórios para VANTs. Este modelo apresenta uma plataforma robusta e expansível, viabilizando a integração e utilização de múltiplos sensores e periféricos. Utilizando o sistema de transmissão de vídeo *Lightbridg*, é possível usar qualquer câmera com saída de vídeo HDMI ou analógica. A Figura 4 apresenta o Matrice 100 equipado com o sensor multiespectral Parrot Sequoia utilizado neste estudo.



Figura 4- Quadricóptero Matrice 100 com sensor Parrot Sequoia.

Fonte: O autor

O Matrice 100 proporciona um voo estável e confiável, com uma grande resistência a ventos. Dispondo de uma bateria recarregável, que possibilita autonomia de voo de até 20 minutos, ainda assim o mesmo possui um *slot* para acoplar outra bateria, capaz de dobrar o tempo de autonomia de voo, garantindo uma melhor flexibilidade, mas por outro lado diminuindo a capacidade de transporte de carga. Utilizando um sistema de propulsão para o voo, o Matrice pode ser guiado a partir de um controle remoto com transmissão de dados e imagem em tempo real. O mesmo possui também um sistema de navegação GPS e GLONASS. Mais informações estão disponíveis em BUZZFLYER UK (2017).

3.5. Painel de calibração de reflectância Mapir

Neste estudo foi utilizado um painel de calibração de reflectância MAPIR modelo V2 (Figura 5), para a calibração radiométrica das imagens obtidas pelo sensor multiespectral Parrot Sequoia. Este painel de calibração de reflectância (PR) possui áreas retangulares com os seguintes tons de cinza: *White*, *Light Gray*, *Dark Gray* e *Black*. Cada um destes subpainéis possuem curvas de reflectância conhecidas, ao longo das bandas do visível, *Red Edge* e NIR; para a calibração radiométrica recomenda-se que este painel seja fotografado com o sensor usado no VANT antes e depois do voo, para que a imagem de cada subpainel seja utilizada como referência para a posterior calibração das imagens em um software como o Agisoft Photoscan. Esta PR é composto por um feltro montado em um substrato de plástico; devido a suas propriedades semelhantes de reflexão difusa e total, as fotografias desta painel podem ser tomadas de qualquer ângulo sem problemas.



Figura 5 – Painel de calibração de reflectância Mapir V2 usado neste estudo

Fonte: O autor

3.6. Sentinel 2 – MSI

Para a aquisição de dados orbitais, a missão Sentinel foi uma iniciativa conjunta da Comissão Europeia e da Agência Espacial Europeia (ESA), no programa *Copernicus*. O Sentinel 2 – MSI (figura 5) tem como objetivo principal o monitoramento da superfície terrestre e oceanos. Essa missão também visa dar continuidade ao imageamento realizado pela série temporal de dados dos satélites SPOT e LANDSAT (ESA, 2012).



Figura 6 – Ilustração do Sensor MSI – Sentinel 2.

Fonte: Adaptado de ESA (2015)

O programa Sentinel 2 conta com uma constelação de dois satélites em órbita polar heliosíncrona: Sentinel 2A e 2B, com o mesmo tipo de sensor a bordo, o *Multispectral Instrument* (MSI). Esses satélites possuem 10 dias de resolução temporal cada, mas com suas órbitas em direções opostas é possível a aquisição de imagens a cada 5 dias em um mesmo ponto da Terra.

O sensor MSI apresenta diferentes resoluções espaciais, conforme suas bandas espectrais (Tabela 2): resolução espacial de 10m para as bandas do visível (três bandas) e NIR (uma banda); 20 m para o RE (quatro bandas) e Infravermelho Médio - SWIR (duas bandas); e 60m para produtos atmosféricos, denominados de Aerossol, Vapor

D'água e Cirrus, que podem ser usados para a correção atmosférica das demais bandas espectrais. Os dados digitais possuem resolução radiométrica de 12 bits, o que possibilita que a imagem seja adquirida em um intervalo de 0 a 4095 (ESA, 2015a).

Tabela 2. Características das bandas espectrais do sensor MSI - Sentinel 2 (ESA, 2015a).

Banda	Nome da banda	Comprimento de onda	Resolução espacial
B02	Blue (Azul)	457,5 - 522,5 nm	10 m
B03	Green (verde)	542,5 - 577,5 nm	
B04	Red (Vermelho)	650 - 680 nm	
B08	NIR (Infr. Próximo)	784,5 - 899,5 nm	
B05	<i>Red Edge 1</i>	697,5 - 712,5 nm	20m
B06	<i>Red Edge 2</i>	732,5 - 747,5 nm	
B07	<i>Red Edge 3</i>	773 - 793 nm	
B08A	<i>Red Edge 4</i>	855 - 875 nm	
B11	SWIR 1	1600 - 1620 nm	
B12	SWIR 2	2100 - 2.280 nm	60m
B01	Aerossol	433 - 453 nm	
B09	Vapor D' Água	930 - 950 nm	
B10	Cirrus	1360 - 1390 nm	

Os dados do sensor MSI passam por diversos níveis de pré-processamento antes de serem disponibilizados para o usuário final. A Tabela 3 apresenta um resumo das principais características nos diferentes níveis de produtos, do Level 0 até o Level 2A.

Tabela 3. Diferentes níveis de processamento nos dados MSI, segundo BAILLARIN (2012)

PRODUTOS	CARACTERISTICAS PRINCIPAIS
Level 0 Level 1A	São produtos do sistema que correspondem respectivamente a dados compactados e descompactados (limitado a fins de calibração interna).
Level 1B	Compreende correções radiométricas (sinal escuro, correção de não uniformidade na resposta dos pixels, identificação de pixels ruidosos, restauração de bandas de alta resolução espacial e restauração para bandas de 60m); modelo físico geométrico anexado ao produto, mas não aplicado.
Level 1C	São imagens ortorrefiticadas, projetadas e contêm dados de refletância ao topo da atmosfera (TOA).
Level 2A	Dados corrigidos dos efeitos atmosféricos, convertidos em reflectância superficial (BOA), pelo método Sen2Cor.

O produto Nível 1C é basicamente o resultado da ortorretificação de imagem nas bandas espectrais por um Modelo de Digital de Elevação (MDE), com os dados referenciados a uma projeção cartográfica e a um sistema de coordenadas geográficas. As medições radiométricas são fornecidas nas reflectâncias ao topo da atmosfera (TOA). Mais detalhes dos processamentos aplicados ao produto Level 1-C podem ser encontrados em BAILLARIN *et al.* (2012).

No início as imagens do Sentinel 2 eram fornecidas somente até os níveis de processamento Level 1C, sendo que os produtos de níveis de processamento superiores não eram disponibilizados, mas poderiam ser gerados pelo usuário através de ferramentas disponibilizadas pela ESA. Em março de 2018 o produto level 2A passou a ser disponibilizado para algumas áreas, e a partir de dezembro de 2018 para toda a Terra, as imagens podem ser baixadas gratuitamente pelo site Copernicus Open Access Hub.

3.6.1 Correção atmosférica de imagens de Sensoriamento Remoto

A REM que é refletida ou emitida pela superfície terrestre e coletada pelos sensores orbitais sofre influências de constituintes atmosféricos, como gases vapor d'água, aerossóis e materiais particulados em suspensão, que provocam processos de espalhamento e absorção dessa forma de energia (JENSEN, 2009). Para a obtenção de dados de reflectância dos alvos ou de índices espectrais como o NDVI a partir dessas imagens orbitais, é de suma importância fazer a correção atmosférica dos dados dessas imagens, pois as regiões espectrais do visível e do infravermelho próximo são afetadas de maneira distinta (EDUARDO; SILVA, 2013).

As imagens usualmente são fornecidas em números digitais (NDs), os quais representam valores de pixels adimensionais e não comparáveis com outros sensores, pelo fato de cada sensor possui critério próprio para discretizar valores de radiância em escala específica, de acordo com sua resolução radiométrica (KUNTSCHIK, 2004). Para a análise comparativa de dados de diferentes sensores é recomendado converter os NDs em valores de reflectância, que, por sua vez, representam as propriedades inerentes dos alvos, determinada pelas suas características físicas, químicas e biológicas, e que pode variar ao longo dos diferentes comprimentos de onda da REM (CHAVES, et al, 2015).

Os produtos Level 1C do sensor MSI são disponibilizados em reflectância TOA, também conhecida como reflectância aparente, sendo denominada assim pelo fato que seus valores físicos não representarem a reflectância real dos alvos terrestres. Sendo assim, a mesma representa não só a resposta espectral dos alvos, mas também a mistura espectral de sinal do alvo com outros na superfície (reflectância aparente), provenientes dos efeitos provocados na interação da radiação solar com os gases atmosféricos (SILVA; ANDRADE, 2013). Esses dados são diferentes da reflectância BOA, que são já corrigidos dos efeitos atmosféricos.

Os métodos de correções atmosférica em imagens orbitais têm como objetivo minimizar os efeitos de distorções causados pela atmosfera durante a aquisição de imagens de satélites. Atualmente estes métodos de correção atmosférica podem ser divididos em dois grupos. O primeiro é o método empírico, o qual se baseia em dados da própria imagem para realizar a correção atmosférica, como por exemplo, no método *Dark Object Subtraction* (DOS). O segundo método consiste no uso de Modelos de Transferência Radiativa (MTR), baseados na aplicação de dados atmosféricos em modelos físicos de simulação dos processos de absorção e espalhamento da REM.

3.6.2 Método Dark Object Subtraction

Dark Object Subtraction (DOS) é um método de correção atmosférica que se baseia em informações da própria imagem para realizar a atenuação dos efeitos aditivos de espalhamento, principalmente provocados pela bruma atmosférica. Este método proposto por CHAVEZ (1988) baseia-se no princípio de que em toda cena e banda espectral, existem pixels que deveriam assumir valores próximo de “0”, referente a alvos de “sombra”, que podem ser provocadas pela topografia do terreno e/ou por nuvens. Entretanto, quando estes alvos apresentam valores maiores que “0”, entende-se que a imagem está sob influência do efeito de espalhamento aditivo causado pela interação da REM com a atmosfera (CHAVEZ, 1988). Após a identificação desses valores adicionais, a correção atmosférica pode ser realizada com base no histograma de frequência de NDs da imagem, onde serão estimados os valores de ganho e “offset” do sensor e, por fim, através da subtração dos valores estimados na imagem, a correção atmosférica é realizada, sendo esta operação feita para toda a imagem, assumindo que existe um espalhamento uniforme em toda a cena (CHAVEZ, 1988).

O método DOS, também conhecido como DOS1, corrige o efeito aditivo do espalhamento causado pela bruma atmosférica, conforme mencionado acima, porém o mesmo não leva em conta os efeitos de transmitância da atmosfera, que pode vir a causar um efeito multiplicativo em função do espalhamento e absorção da REM. Sendo assim, CHAVEZ (1996) propôs uma modificação do método DOS1, denominado DOS2. Este novo método visa corrigir os efeitos aditivos e multiplicativos causados pelos efeitos da atmosfera. Para isto, a transmitância passou a ser estimada pelo cosseno do ângulo zenital.

O DOS é amplamente utilizado para a correção atmosférica, devido à sua facilidade de implementação, pois encontra-se presente na maioria dos *softwares* de processamento de imagens. Outra vantagem é que este pode ser utilizado em todas as imagens de satélites, pois o mesmo baseia-se apenas nas informações das próprias imagens para a correção, diferente de algoritmos de correção atmosférica baseados no MTR, que necessitam de dados e informações mais específicos de cada sensor.

3.6.3 Método SEN2COR

O Sen2Cor é um *software* desenvolvido pela ESA, exclusivamente para tratamento de produtos Level 1C do sensor MSI. Esse algoritmo permite o cálculo da reflectância BOA a partir das imagens de reflectância TOA disponíveis nos produtos de Nível 1C (WILM et al., 2013).

A correção atmosférica realizada por esse aplicativo é baseada em um algoritmo proposto na Correção Atmosférica/Topográfica para imagens de satélites, que utiliza como base o MTR LIBRADTRAN (MAYER; KYLLING, 2005).

Este algoritmo basicamente recebe como entrada o produto Level 1C do sensor MSI, que consiste em 13 imagens JPEG-2000 de três resoluções espaciais: 10 m, 20 m e 60m (Tabela 2). A partir das informações contidas no produto Level 1C, o algoritmo cria um grande banco de dados de tabelas de consulta, com os parâmetros e funções específicos do sensor, que depois são remodelados como respostas espectrais, em uma alta resolução espectral (0,6 nm) e utilizados para o cálculo de correção atmosférica. Como o produto Level 1C possui toda informação necessária para rodar o Sen2Cor, o algoritmo extrai automaticamente dos metadados das próprias imagens todas as informações e parâmetros necessários para o cálculo de correção atmosférica

(RICHTER; LOUIS; BERTHELOT, 2012). Por exemplo, a espessura óptica de aerossol é derivada das imagens pelo algoritmo, com base na metodologia adaptada de KAUFMAN *et al.* (1997). O algoritmo também recupera dados como vapor d'água, além de ser capaz de detectar e remover nuvens cirrus e identificar sombras de nuvem. Este método também pode corrigir a influência de pixels vizinhos ou adjacentes.

Após os diversos processos que são aplicados pelo algoritmos Sen2Cor descritos por RICHTER (2012), o cálculo utilizado para transformar os valores de reflectância TOA do produto Level 1C em reflectância BOA está descrito na Equação 4:

$$L(k) = \frac{E_s(k) \cos\theta_s}{\pi d^2} \rho_{TOA}^{(k)} \quad (4)$$

Onde k , E_s , θ_s e d são o índice de banda; a irradiação solar extraterrestre para uma distância astronômica de 1; o ângulo de zenital solar e a distância terra-sol em unidades astronomia, respectivamente. E_s depende do banco de dados espectral de irradiação solar e ρ_{TOA} é referente aos valores de NDs na imagem.

Como parâmetro de saída para o método de correção atmosférica Sen2Con, é gerado o produto Level 2A, que contém um mapa de classificação de cena, indicadores de qualidade para a detecção de neve e nuvem, mapa de espessura óptica de aerossol, mapa de vapor d'água e imagens corrigidas para reflectância de superfície BOA.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O capítulo descritivo dos procedimentos metodológicos usados nesta dissertação está subdividido em duas partes: i) localização e caracterização da área de estudo; ii) descrição dos métodos.

4.1. Localização e Caracterização da Área de Estudo

Este estudo foi realizado na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), localizada no município de Eldorado do Sul, na região metropolitana de Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul - RS (Figura 7). A EEA abrange uma área total de aproximadamente 1.560 hectares, onde predomina o Argissolo Vermelho Distrófico, de textura argilosa e relevo ondulado, tendo como substrato rochas graníticas (EMBRAPA, 1999).

A avaliação foi conduzida no dia 4 de outubro de 2018, em duas lavouras de aveia preta (*Avena strigosa Schrec*), ambas no início do florescimento, mais precisamente na fase 60 do estágio fenológico, de acordo com a escala de ZADOKS (1974), sendo uma lavoura com 5 ha de área plantada e outra com 2,5 ha, localizadas ao sul da EEA/UFRGS.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é subtropical de verão, quente e úmido, do tipo Cfa, com precipitação pluvial média anual de 1.445 mm (BERGAMASCHI et al., 2013). Na tabela abaixo, estão descritos dados de uma estação meteorológica automática (latitude $-30,0965^{\circ}$ e longitude $-51,6739^{\circ}$; altitude 32 m; Datum SIRGAS 2000) localizada na EEA (Figura 7), a cerca de 1,5 km da área A e 1,8 km da área B de aveia preta, relativo ao início do mês de outubro de 2018 (Tabela 4).

Tabela 4 – Dados da estação meteorológica da EEA do início de outubro de 2018

Out 2018	Chuva	Temp média	Máx	Mín	UR	Pressão	Temp do Solo	Umid. Solo	Rad. Solar	PAR	ET
Dia	mm	°C	°C	°C	%	hPa	°C	%	MJ.m ⁻²	umol.s.m ⁻²	mm.dia ⁻¹
1	11,2	19,0	22,0	16,1	93,2	1003,6	21,0	31,1	7052,4	2530,0	1,2
2	1,6	15,8	17,1	14,5	86,0	1008,8	20,4	30,4	6685,2	2507,0	1,7
3	0,0	15,9	18,4	13,7	82,3	1010,7	19,5	28,5	8658,0	3163,0	5,4
4	0,0	16,7	23,8	9,8	68,9	1014,4	19,3	27,8	24728,5	8243,0	5,3
5	0,0	15,3	21,5	9,2	63,6	1016,5	19,4	27,0	25153,3	8388,0	4,7

Sendo: UR = Umidade relativa do ar; PAR = Radiação fotoativa; ET = Evapotranspiração.

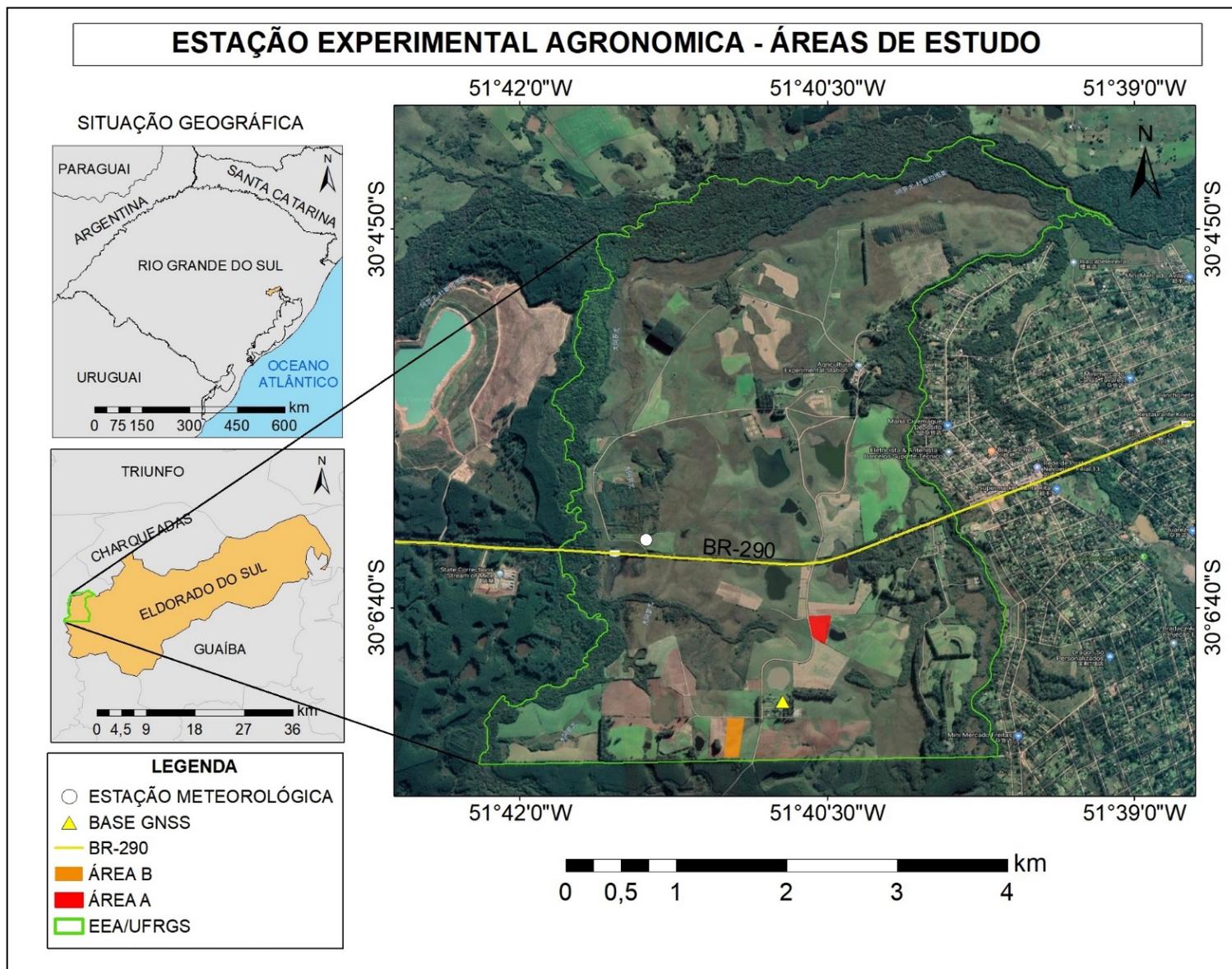


Figura 7 - Localização da área de estudo sobre composição colorida RGB321 de imagem Planetscope (04/10/2018).

4.2 Métodos

Os procedimentos utilizados nesta dissertação estão descritos no fluxograma da Figura 8. Foram basicamente cinco etapas: i) levantamento e aquisição dos dados terrestres e suborbitais; ii) correção geométrica e radiométricas dos dados suborbitais; iv) correção atmosférica dos dados orbitais; v) avaliação da acurácia radiométrica dos produtos de reflectância suborbital e orbital.

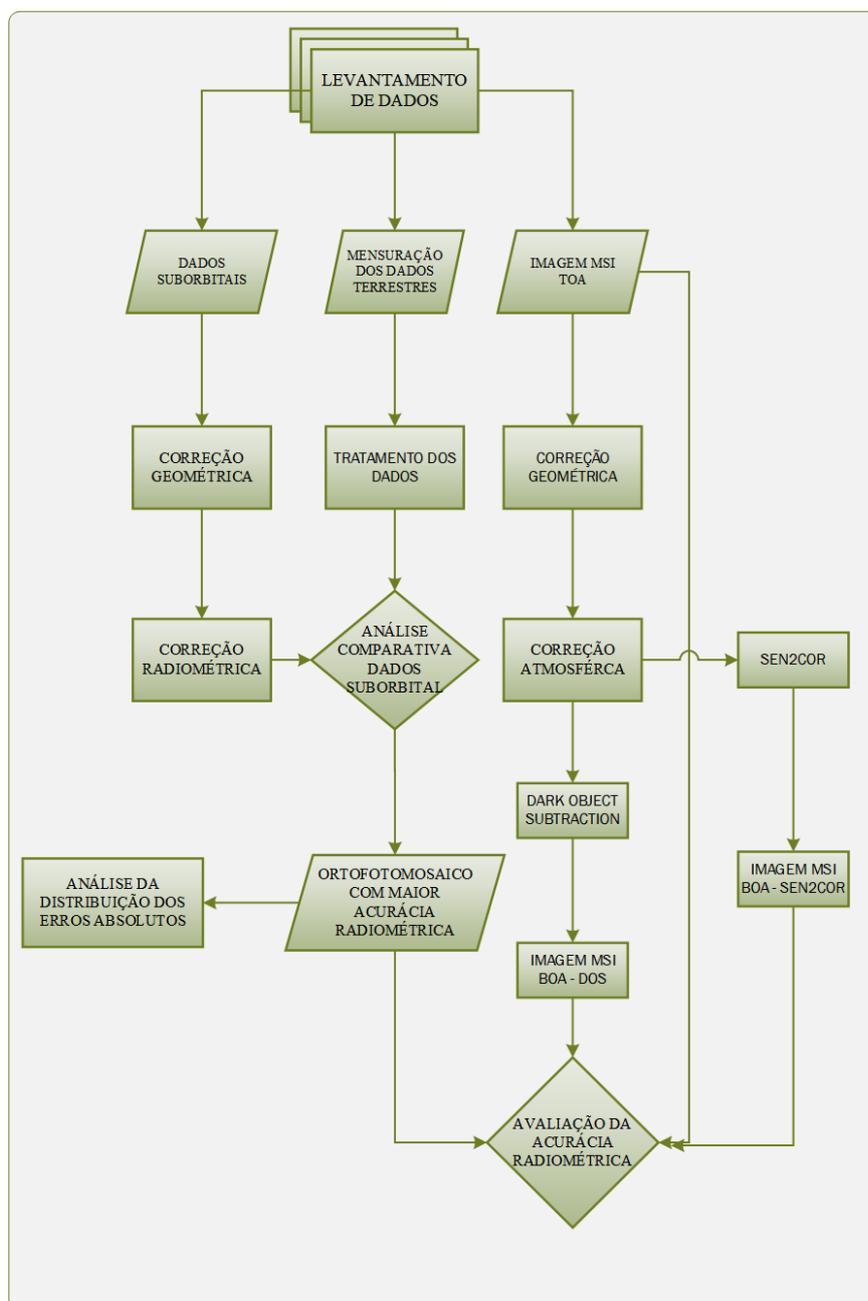


Figura 8 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos deste estudo

4.2.1 Aquisição dos dados em nível terrestre e suborbital

Os levantamentos terrestres e suborbital foram realizados no dia 04 de outubro de 2018. Antes da execução dos voos com o Matrice 100, foi estacionado um receptor geodésico Topcon modelo Hiper Lite Plus em um marco com coordenadas conhecidas, localizado na EEA, a cerca de 400 m da área B e 700 m da área A (Figura 7). Posteriormente, foram fixadas 8 pré-sinalizações (50 x 50 cm, fotoidentificáveis) na área A e 3 na área B de aveia preta, cujas coordenadas geográficas foram medidas por meio de outro receptor geodésico Topcon Hiper Lite Plus (*rover*).

Para as aquisições dos dados suborbitárias foi utilizado o sensor multiespectral Sequoia, acoplado ao quadricóptero Matrice 100 (Figura 4). Para posterior calibração radiométrica das imagens adquiridas pelo sensor sequoia, além do Sunshine Sensor (SS), foi utilizado o painel de calibração Mapir V2 (Figura 5), onde foram feitas imagens deste painel antes de cada voo. O plano de voo foi elaborado no programa Pixel4D capture (Pix4D, AS), que também foi usado para a execução do voo: altura de vôo de 100 m; sobreposição frontal de 85% e lateral de 60%; imagens com resolução espacial (*Ground Sample Distance* – GSD) de 9,4 cm. Durante este levantamento aéreo, foi utilizado um sensor luxímetro ICEL LD540 para medir a intensidade luminosa local (em lux) durante os períodos dos voos. O primeiro voo foi executado sobre a área A – 2,5 ha (Figura 7), às 11:50 h do horário local, enquanto que o voo sobre a área B (5 ha) ocorreu após cerca de uma hora. A duração média dos voos foi de aproximadamente 5 min e estes foram executados sem a cobertura de nuvens nas áreas levantadas. A irradiância solar sobre as áreas durante esse período foram medidas por um luxímetro, que registrou valores entre 103.000 a 104.000 lux na área A e próximos de 105.000 lux na área B.

Os dados do sensor Parrot Sequoia foram adquiridos antes da coleta dos dados terrestres, em ambas as áreas estudadas, pois durante a coleta dos dados de reflectância pelo sensor Crop Circle ocorre alteração na densidade das plantas pelos caminhamentos e pisoteios sobre as mesmas.

Na aquisição dos dados terrestres pelo sensor Crop Circle Model ACS-430 (Figura 2), os pontos de coletas dos dados foram definidos a partir de uma grade amostral com 10 m x 10 m, criada em um ambiente de SIG (*software* ArcMap 10.3). O primeiro passo em ambas as áreas foi a localização do primeiro e do

último ponto de cada alinhamento no terreno, por meio de um receptor GPS de navegação. A localização destes foi confirmada por medidas feitas com trena, a partir de cercas. Posteriormente, foi colocada uma baliza sobre o primeiro ponto de cada alinhamento e os demais pontos foram localizados a cada 10 m, por meio da técnica de passo aferido e de medições com trena. Sobre cada um desses pontos foram medidas as reflectâncias espectrais das plantas de aveia preta, a uma altura de aproximadamente 50 cm do dossel. As coordenadas geográficas desses pontos foram medidas pelo receptor de dupla frequência Topcon (*rover*), por levantamento *Stop and Go*, do tipo estático rápido (2 min em cada ponto). As coordenadas desses pontos de coleta e das pré-sinalizações de apoio fotogramétrico foram corrigidas no programa Topcon Tools, pelo método relativo pós-processado, usando dados da base GNSS instalada na EEA/UFRGS – Figura 7 (Base: latitude $-30,118775^\circ$ e longitude $-51,678630^\circ$; altitude 74,719 m) e de uma estação GNSS da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada no prédio do departamento de Geodésia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Estação POAL: latitude $-30,074043^\circ$ e longitude $-51,119770^\circ$; altitude 77,533 m). As coordenadas altimétricas dos pontos de coleta e pré-sinalização foram corrigidas pelo modelo de ondulação geoidal MapGeo do IBGE.

4.2.1.1 Processamento geométrico das fotografias aéreas

O processamento geométrico das imagens aéreas foi realizado após o trabalho de campo, no software Agisoft Photoscan 1.4.5, onde foi criado um projeto fotogramétrico e a posterior importação das fotografias (com Geotags para cada fotografia, contendo as coordenadas geográficas, referenciadas ao elipsóide WGS84, altura elipsoidal ao WGS84, e distancia focal da câmera). Basicamente, as fotografias foram georreferenciadas automaticamente pelos seus metadados, a partir dos parâmetros de orientação externa dos Geotags. A aerotriangulação do Agisoft Photoscan é feita através de um algoritmo *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), com base na procura de pontos homólogos nas fotografias, e pela aplicação de técnicas de *Structure from Motion* (SFM) e Multiview Stereo (MVS), tendo como resultado uma densa nuvem de pontos. As coordenadas planialtimétricas das pré-sinalizações do

terreno fotoidentificáveis foram usadas para ajustar o georreferenciamento da nuvem de pontos e das fotografias. No Photoscan, os dados da nuvem de pontos planialtimétricos são interpolados pelo método de Rede Irregular Triangular (TIN), para a geração de um MDE. Este modelo foi usado para a ortorretificação das imagens, com um GSD de 9,4 cm. O método de reamostragem das fotografias foi o do vizinho mais próximo, usado para preservar os valores de números digitais (imagens de 12 bits), para que estes dados pudessem ser usados adequadamente nas posteriores análises radiométricas dessas imagens. Por fim, as fotografias multiespectrais e retificadas geometricamente foram usadas para a geração de um ortofotomosaico para as áreas A e B de aveia preta.

4.2.1.2 Calibração radiométrica das fotografias aéreas

As correções radiométricas dos ortofotomosaicos foram realizadas no Photoscan, primeiramente com o uso dos dados de irradiância solar do *Sunshine Sensor* (SS) e, após, com as imagens pré-voo tomadas do painel de calibração Mapir V2 a partir do sensor Sequoia. Nesta calibração, foram selecionadas as fotografias tomadas com menor tempo de exposição pelo sensor Sequoia (obturador 1/2933,32), para evitar a saturação de brilho pelos tons de cinza mais claros do PR.

Após sua importação para o Photoscan, foi selecionada cada uma das bandas espectrais de interesse (Red, RE e NIR), identificado um dos subpainéis do PR (*White*, *Light Gray*, *Dark Gray* e *Black*), e então delimitada a área de abrangência deste subpainel na imagem do painel Mapir. Em seguida, foi importado um arquivo CSV com os dados de reflectância do respectivo alvo delimitado, o qual posteriormente foi usado para a calibração radiométrica da imagem de cada banda espectral do Sequoia. Para cada uma das painéis, realizou-se duas correções radiométricas, com reflectância total e outra usando os parâmetros de configuração de reflectância difusa. Por último, foram realizadas as correções radiométricas com as informações do SS, juntamente com os dados do PR Mapir. Todos os ortofotomosaicos foram exportados para o formato GeoTIF, sem qualquer compressão, para preservar os NDs.

4.2.1.3 Validação dos ortofotomosaicos com dados do Crop Circle

A validação dos valores de reflectância nas bandas Red, RE e NIR, e dos índices NDVI e NDRE derivados dos ortofotomosaicos, gerados pelos diferentes parâmetros usados na etapa da correção radiométrica, foi realizada por meio dos valores dessas variáveis radiométricas nos pontos medidos com o sensor Crop Circle. Os dados discretos adquiridos pelo Crop Circle foram importados no programa ArcMap 10.3, na forma de *shapefile* de pontos. Todos os ortofotomosaicos foram importados para esse programa e, posteriormente, foi usada a ferramenta “*extract multi value by points*” para extrair os valores de NDs dessas imagens para o banco de dados do arquivo de pontos. O valor extraído das imagens foi calculado por meio da técnica de interpolação bilinear, que estima o valor a ser extraído com base nos quatro valores de NDs mais próximos (janela 2 x 2 pixels). Este processo foi realizado para cada uma das áreas estudadas, utilizando seus respectivos pontos de coletas. Por fim, os valores extraídos foram exportados em formato CSV e tratado em planilhas eletrônicas (software Microsoft Excel). Antes da etapa de comparação entre os resultados dos dois sensores, foi realizada uma filtragem dos dados do Crop Circle que apresentassem mais do que um desvio-padrão dos valores dos pontos de cada área experimental, para eliminar valores incoerentes.

Como um dos parâmetros estatísticos para a análise da acurácia radiométrica dos dados analisados, optou-se pelo cálculo do Erro Absoluto Médio (EAM), que é dado por meio do somatório da diferença em módulo entre os valores estimados e os valores observados (Equação 5). Neste caso os valores observados são os dados obtidos com o sensor Crop Circle, e os valores estimados os dos ortofotomosaicos corrigidos radiometricamente pelos diferentes parâmetros.

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |V_{est} - V_{obs}|}{N} \quad (5)$$

Sendo, “ V_{est} ” os valores estimados e “ V_{obs} ” os valores observados, e “ N ” o número de amostras.

Para obter os erros percentuais relativos, calculou-se o Erro Relativo Médio (ERM), que é obtido pela razão entre o EAM e o valor observado, multiplicado por 100 para o resultado em percentual (Eq. 6).

$$ERM = \frac{100 \sum_{i=1}^n |V_{est} - V_{obs}|}{N V_{obs}} \quad (6)$$

Outra medida adotada para avaliar a acurácia dos ortofotomosaicos foi o Erro Quadrático Médio (EQM), sendo este basicamente uma medida que representa o desvio padrão das diferenças entre os valores estimados e os valores observados (Eq. 7)

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{est} - V_{obs})^2}{N} \quad (7)$$

Outros parâmetros estatísticos foram adotados para descrever as diferenças entre os valores observados e estimados: coeficiente de massa residual (CRM), coeficiente de correlação (r) e índice de concordância de Willmott.

O CRM consiste basicamente na diferença entre a soma dos valores observados e a soma dos valores estimados, dividido pelo valor da soma dos observados. Pode apresentar valores que variam entre $-\infty$ e $+\infty$, tendo como ótimo resultado o valor zero (indicando ajuste ideal); os valores negativos indicam a subestimação dos valores previstos, já os valores positivos apontam sua superestimação (BONFANTE et al., 2010).

O coeficiente de correlação r estima o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas, onde o resultado é um índice adimensional com valores situados ente -1, 0 e 1.0, sendo que, os valores próximos a zero indicam a ausência de correlação (ADDISCOTT; WHITMORE, 1987);

O índice de concordância desenvolvido por Willmott é designado pela letra “d” e representa a precisão e o grau de discrepância entre os dados reais (neste caso, os dados obtidos pelo sensor Crop Circle) e os valores estimados (valores mensurados pelo sensor Sequoia). Este índice de concordância pode variar de 0 a +1, onde valores próximos ou igual a +1 indicam concordância perfeita entre os dados; já valores

próximos de zero indicam desacordo total (WILLMOTT; ROBESON; MATSUURA, 2012).

Como indicador de confiança ou desempenho dos dados estimados, foi utilizado o coeficiente “c”, calculado a partir do produto entre o índice de concordância e o coeficiente de correlação ($c = d*r$). Os valores de c menores do que 0,40 representam baixa confiabilidade e valores maiores do que 0,85 indicam ótima confiança dos dados estimados (CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, 1997).

Levando em consideração as resoluções espaciais e radiométricas dos sensores utilizados nesse trabalho, será considerado nesta análise estatística valores com duas casas decimais.

4.2.2. Processamento e avaliação das imagens MSI-Sentinel 2

Neste experimento, foi usada uma imagem Level 1C do MSI-Sentinel 2, adquirida em 5 de outubro de 2018, um dia após o levantamento de dados de campo com o Crop Circle e Parrot Sequoia. Esta imagem multiespectral foi processada no aplicativo SNAP, que foi usado para a correção atmosférica dos dados das bandas Red, RE e NIR, por meio do algoritmo Sen2Cor. Esse plugin converte imagens reflectância TOA para produtos Level 2A, com reflectância BOA. Ao término do processo de correção atmosférica, as bandas espectrais (4, 6 e 8) com reflectância BOA geradas foram exportadas em formato TIF. Posteriormente, foi feita a conversão da imagem multiespectral para o sistema de coordenadas geográficas e datum WGS84, no programa Arcmap 10.3.

A correção atmosférica pelo método DOS1 foi realizada por meio *Semi-Automatic Classification plugin* (SCP), disponível no *software* QGIS 2.18. No SCP foi usado como dado de entrada o produto Level 1C (reflectância TOA) e o dado de saída foi o produto Level 2A (reflectância BOA), no formato Geotif. Em seguida, as bandas espectrais (4, 6 e 8) foram importadas para o banco de dados no ArcMap 10.3. Neste último programa, foi realizada a reamostragem dos pixels da imagem da banda 6 (*Red Edge*), dos 20 m originais para 10 m de resolução espacial, utilizando como método de interpolação o vizinho próximo.

As imagens MSI-Sentinel 2 TOA e BOA são apresentadas com valores de pixel em NDs. Para posterior comparação com os dados do sensor Sequoia, houve a necessidade de reescalonar os valores desses pixels para valores contínuos de

refletância com intervalos entre 0 e 1. Para tanto, todas as bandas espectrais foram divididas pelo valor 10.000, que é o utilizado para a quantização dos dados Sentinel 2. O mesmo processo não foi necessário para as bandas corrigidas pelo método DOS1, pois as mesmas já são transformadas de ND para valores de refletância BOA.

A acurácia dos produtos orbitais gerados pelos diferentes métodos de correção atmosférica (DOS e Sen2Cor) e do produto de refletância TOA foi avaliada a partir dos dados do ortofotomosaico com melhor acurácia radiométrica, com menores valores de EAM (Equação 5), ERM (Equação 6) e EQM (Equação 7).

Para extração dos valores de refletância do ortofotomosaico, primeiro foram delimitados polígonos nas duas áreas de aveia preta, de forma a evitar pixels adjacentes a outros alvos presentes na cena, como cercas e estradas. No banco de dados do ArcMap 10.3, foi criada uma malha quadriculada com resolução espacial de 10m, de forma a coincidir com os limites dos pixels das imagens MSI-Sentinel 2 nas cenas. Esta malha foi usada para extração e posterior análise estatística dos valores de refletância das imagens MSI com relação aos dados de refletância dos ortofotomosaicos, nas duas áreas de estudo, através da ferramenta *zonal statistics table*. Essa ferramenta basicamente calcula as estatísticas (média, desvio-padrão) de todos os pixels do ortofotomosaico presentes para cada um dos pixels da malha. Para análise destes resultados, optou-se pelo uso dos mesmos parâmetros estatísticos utilizados anteriormente: EAM, ERM e EQM. Da mesma forma que nos dados do Sequoia, foram considerados erros radiométricos expressos por números com duas casas decimais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados primeiramente os resultados alcançados na avaliação da acurácia radiométrica nos dados obtidos com as medidas de reflectância espectral, dos índices NDVI e NDRE das áreas de aveia preta da EEA, com os sensores multiespectrais Crop Circle e Sequoia. Posteriormente, será descrita a avaliação da acurácia radiométrica dos dados do sensor MSI-Sentinel 2, sem e com a aplicação de métodos de correção atmosférica, a partir dos dados de reflectância espectral, de NDVI e NDRE derivados do ortofotomosaico com maior acurácia radiométrica.

5.1 Avaliação da acurácia radiométrica das imagens do sensor Sequoia

A Figura 9 apresenta a distribuição dos pontos coletados em campo com o sensor Crop Circle sobre o ortofotomosaico, nas duas plantações de aveia preta estudadas. Na área A, foram coletados 142 pontos, distribuídos em uma área de aproximadamente 1,31 ha, enquanto que na área B foram coletados um total de 36 pontos, em uma área de aproximadamente 0,46 ha.

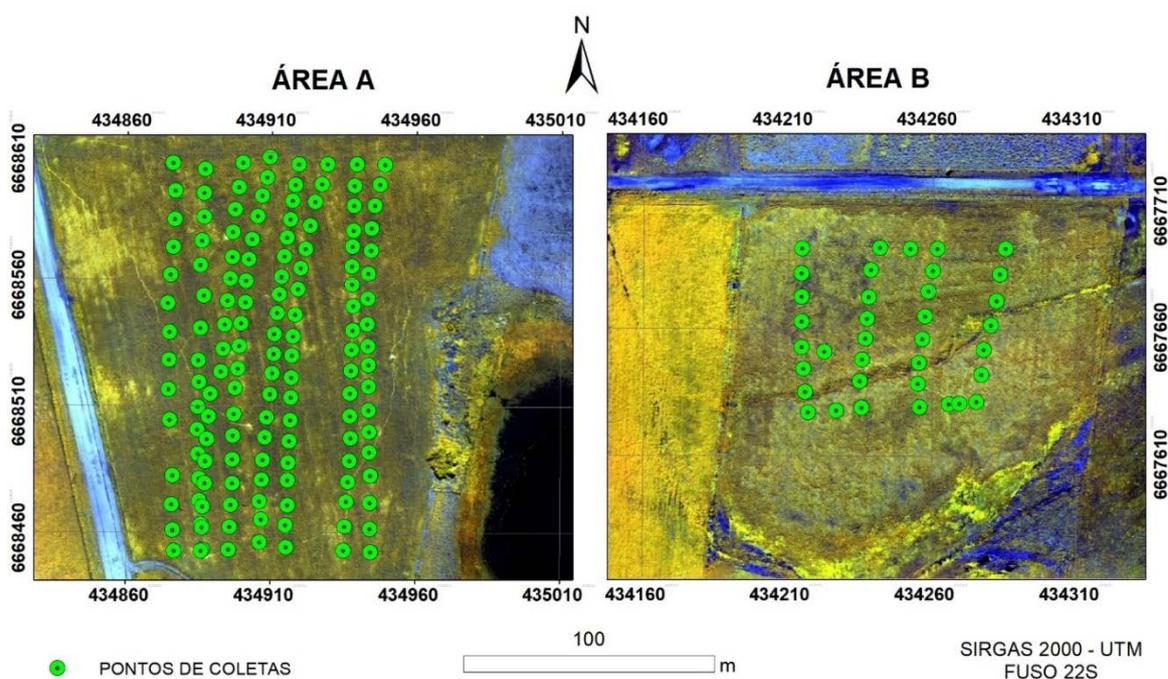


Figura 9 - Distribuição dos pontos de coleta do sensor Crop Circle sobre composição colorida RGB 432 dos ortofotomosaicos da câmera Sequoia.

Os erros do georreferenciamento dos ortofotomosaicos das áreas A e B foram avaliados no Photoscan, a partir dos pontos das pré-sinalizações (*Ground Control Point – GCP*). Na Tabela 5, estão descritas a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) planimétrico e altimétrico desses ortofotomosaicos, assim como o RMSE dos pontos de coleta do Crop Circle, calculados no programa Topcon Tools.

Tabela 5 - RMSE planimétrico e altimétrico dos ortofotomosaicos e dos pontos de coleta do Crop Circle, nas duas áreas de Aveia Preta.

Área	RMSE Ortofotomosaicos (m)		RMSE Pontos de Coleta (m)	
	Planimetria	Altimetria	Planimetria	Altimetria
A	0,136	0,151	0,160	0,458
B	0,138	0,120	0,383	0,452

Os resultados estatísticos de EAM, desvio-padrão e ERM obtidos na comparação entre a refletância e IVs obtidos pelos sensores Sequoia e Crop Circle estão apresentados graficamente nas Figuras 10 e 11, para as áreas A e B.

Os valores de reflectância espectral obtidos para os ortofotomosaicos sem correção radiométrica (SC), apresentaram EAM maiores do que 0,2. Na área A, na banda espectral do Red, o EAM foi de $0,22 \pm 0,04$; no entanto, o ERM foi elevado, de 317%. Na área B, o ERM foi ainda maior, de 345%. Para a banda do RE foram encontrados EAM significativos ($A = 0,54 \pm 0,09$ e $B = 0,42 \pm 0,09$), também observados no NIR ($A = 0,47 \pm 0,09$; $B = 0,71 \pm 0,11$). Em contrapartida, o NDVI para o ortofotomosaico SC obteve boa acurácia radiométrica: na área A apresentou EAM baixo ($0,18 \pm 0,09$), com ERM de 28% e EQM de 0,04, e na área B apresentou resultados mais próximos dos mensurados a campo, com EAM de $0,11 \pm 0,07$, ERM de apenas 16% e EQM de 0,02. Por outro lado, na imagem NDRE o ERM foi elevado na área A (93%) mas baixo na área B (23%).

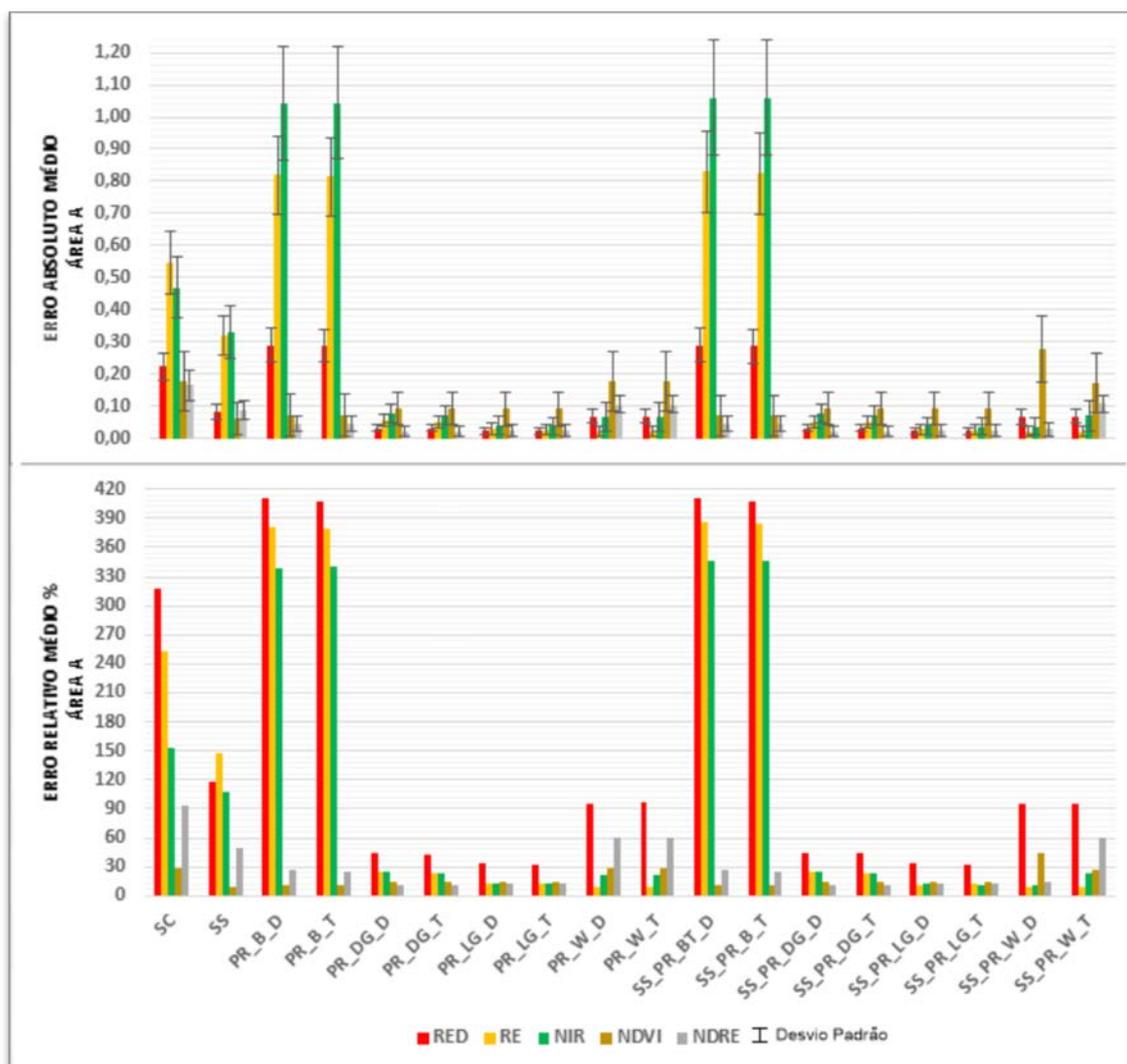


Figura 10 - Erro absoluto médio e desvio-padrão, e Erro relativo médio dos ortofotomosaicos obtidos a partir de diferentes referências de calibração radiométrica (SC= sem calibração; SS = Sunshine sensor; percentual de reflectância do PR = Painel de calibração de reflectância Mapir: B = Black; DG = Dark Gray; LG = Light Gray; W = White; D = Diffuse; T = Total) com relação aos pontos de coleta do Crop Circle (bandas Red, RE, NIR; NDVI e NDRE) na área A.

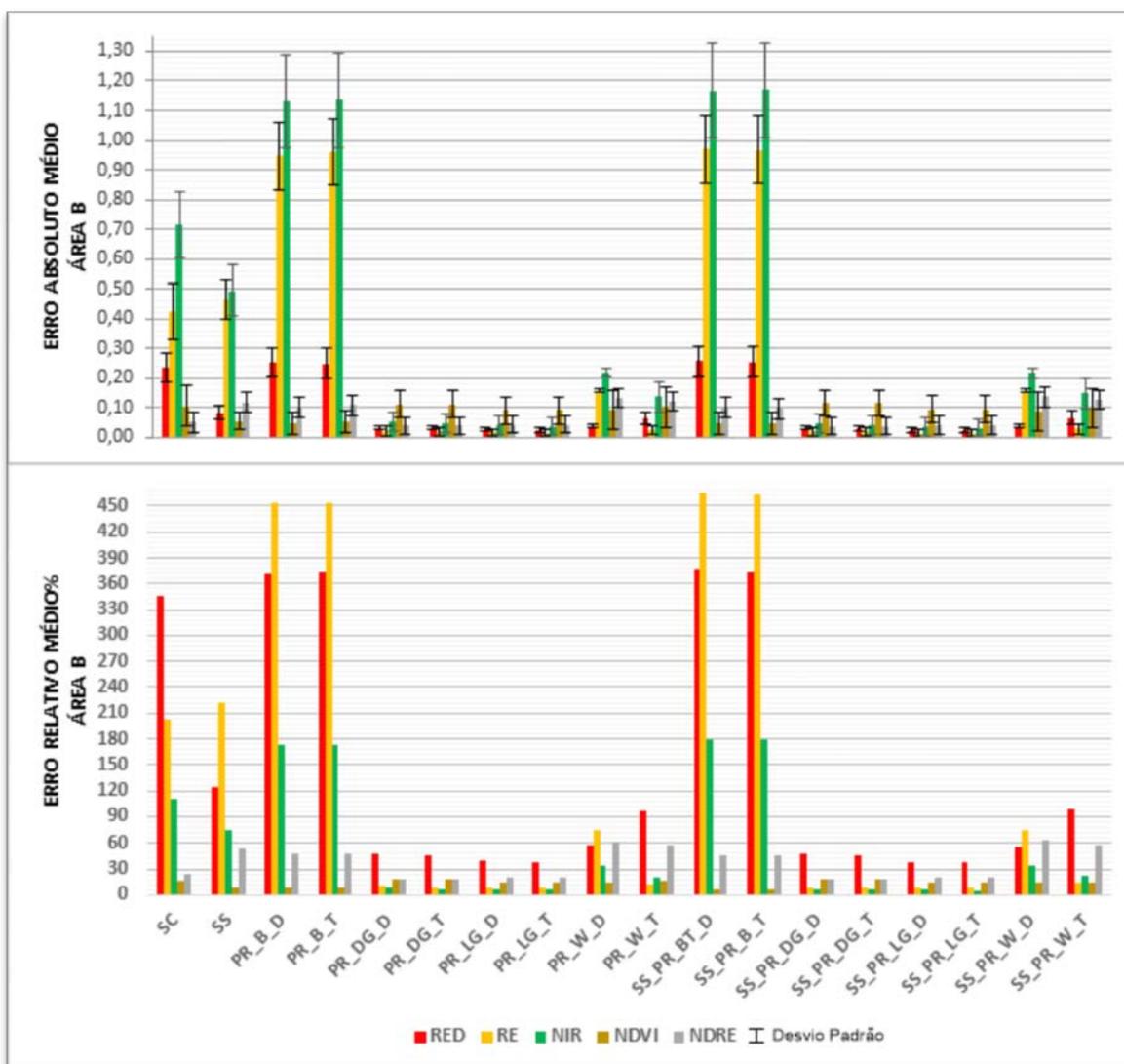


Figura 11 - Erro absoluto médio e desvio-padrão, e Erro relativo médio dos ortofotomosaicos obtidos a partir de diferentes referências de calibração radiométrica (SC= sem calibração; SS = Sunshine sensor; percentual de reflectância do PR = Painel de calibração de reflectância Mapir: B = *Black*; DG = *Dark Gray*; LG = *Light Gray*; W = *White*; D = *Diffuse*; T = *Total*) com relação aos pontos de coleta do Crop Circle (bandas Red, *Red Edge*, NIR; NDVI e NDRE) na área B.

Os ortofotomosaicos corrigidos pelos dados do *Sunshine Sensor* (SS), de um modo geral, apresentaram maior similaridade com os dados do Crop Circle do que os ortofotomosaicos SC, mas ainda assim foram encontrados erros significativos nestes primeiros. Na área A, o ortofotomosaico da banda Red apresentou baixo EAM ($0,08 \pm 0,02$), porém ERM alto (117%); o mesmo ocorreu para a imagem da área B, com ERM de 125%. Nas demais bandas, os valores de EAM foram os seguintes: RE (A = $0,32 \pm 0,06$ e B = $0,42 \pm 0,06$); e NIR (A = $0,33 \pm 0,09$ e B = $0,50 \pm 0,03$). O NDVI calculado a partir do ortofotomosaico SS da área A teve EAM igual a $0,06 \pm 0,05$, ERM de apenas 10% e EQM de 0,01. A imagem de NDVI da área B também apresentou bons resultados, com EAM de $0,05 \pm 0,03$ e ERM de apenas 8%. Esses bons resultados podem estar relacionados ao comportamento proporcional dos erros no Red e NIR, que são as bandas usadas no cálculo desse índice. O mesmo não aconteceu com o NDRE, que apresentou resultados insatisfatórios: o ortofotomosaico da área A teve EAM de $0,09 \pm 0,03$ e EQM de 0,03, mas com ERM alto, de 50%; na área B os resultados foram ainda piores, com EAM de $0,12 \pm 0,03$, EQM de 0,02 e ERM de 54%. Isto ocorreu pela diferença entre as proporções de erros do RE em relação ao NIR, uma vez que o RE apresentou erros maiores, conforme observado anteriormente.

Para as imagens corrigidas com o PR só houve mudanças significativas quando se variou os subpainéis (*Light Gray*, *Dark Gray* e *Black*), sem alterar suas configurações de reflectância difusa ou total, pois as mudanças só foram detectadas a partir de 10^{-3} , com exceção do subpainel *White*, onde houve pequena variação na reflectância com a mudança de configuração no PR (*Diffuse* ou *total*). Outra observação é que os resultados com a utilização somente do PR ou os obtidos com os dados deste painel com os do SS foram muito próximos, ou seja, não houve ganho e/ou perdas significativas nos resultados. Sendo assim, os resultados serão considerados iguais neste caso e, portanto, os resultados discutidos consideram apenas os PRs.

O subpainel *Black* apresentou resultados insatisfatórios para a calibração dos ortofotomosaicos das bandas espectrais, para as duas áreas de estudo. Na banda Red o EAM foi de $0,29 \pm 0,12$, com ERM alto (411%) e EMQ igual a 0,29; na área B a proporção de erros foi semelhante, com ERM de 372%. Na banda RE a relação com os dados coletados pelo Crop Circle foi ainda menor: na área B o EAM foi de $0,95 \pm 0,09$, com ERM de 434% e EMQ igual a 0,95; já na área A o ERM foi um pouco menor (381%). Na banda NIR os erros mantiveram-se altos, principalmente na área A (EAM

= $1,04 \pm 0,18$; EQM = 1,06; ERM = 339%). Por outro lado, os resultados obtidos nos IVs foram bem relacionados com os dados medidos com o Crop Circle: o ortofotomosaico de NDVI da área teve EAM de $0,07 \pm 0,07$, EMQ de 0,08 e ERM de apenas 12% apenas, que na área B foi ainda menor, de 7%. O ortofotomosaico de NDRE da área A teve EAM de $0,05 \pm 0,02$ e ERM de 26%, enquanto que o da área B teve ERM maior, de 47%.

Os erros do ortofotomosaico das bandas espectrais corrigidos com a PR a partir do subpainel *Black* podem estar relacionados com as características de baixo brilho da fotografia do painel tomada pelo Sensor Sequoia, que por ficar em um curto tempo de exposição, pode prejudicar a sensibilidade do subpainel *Black*. Já a boa correlação alcançada com os IV é devido a proporção de erros semelhantes das bandas espectrais, que é compensada pela aritmética de bandas para o cálculo dos IVs.

Os resultados do ortofotomosaico obtidos com o uso do subpainel *Dark Gray* mostraram ganhos de acurácia radiométrica, tanto para as bandas espectrais quanto para os IVs avaliados, onde o ERM foi inferior a 50% nas bandas espectrais, para as duas áreas, e em alguns casos chegando a resultados ótimos, como na área B, com ERM de 48% (Red), 10% (RE), 8% (NIR), 17% (NDVI) 18% (NDRE).

Os melhores resultados foram obtidos para o ortofotomosaico multiespectral corrigido a partir do subpainel *Light Gray*. O ortofotomosaico Red da área A obteve um EAM de $0,02 \pm 0,01$, EMQ próximo de zero, e ERM de 33%. Resultados similares de EAM e EQM também foram observados para a área B, que obteve um ERM maior, mas de apenas 38%. O ortofotomosaico da área A obtiveram baixos erros nas bandas RE (EAM = $0,3 \pm 0,2$; ERM = 13%) e NIR (EAM = $0,04 \pm 0,03$; ERM = 13%). O mesmo foi observado para o ortofotomosaico da área B (RE com EAM = $0,02 \pm 0,01$; ERM = 8%; NIR com EAM = $0,04 \pm 0,03$; ERM = 7%). Da mesma forma, apenas os IVs apresentaram resultados próximos aos mensurados a campo: o ortofotomosaico de NDVI da área A obteve EAM de $0,09 \pm 0,05$ e baixo EQM (0,01), com ERM de 14%, enquanto que o da área B os resultados foram bem próximos, com EAM de $0,09 \pm 0,05$ porém com um ERM de 14%. De um modo geral, para este subpainel o NDRE apresentou os melhores resultados em relação aos dados de campo. No ortofotomosaico da área A, por exemplo, obteve-se um EAM de $0,02 \pm 0,02$, EQM próximo de zero e ERM 12%, e no da área B esses erros foram similares, porém alcançando um ERM pouco maior de 21%, mas que ainda pode ser considerado baixo.

O painel de referencia *White*, de um modo geral, apresentou resultados medianos (abaixo dos resultados alcançados com a PR *Light Gray*). Porém, neste PR houve diferença significativa com a alteração das configurações de reflectância *Diffuse* ou *total*. Na área A de estudo, para a banda espectral do Red os melhores resultados foram observados na configuração *Diffuse*, que apresentou EAM baixo ($0,07 \pm 0,02$) mas com ERM alto (95%), já na área B os melhores resultados foram obtidos da mesma configuração que apresentou EAM baixo ($0,04 \pm 0,02$), mas com ERM ainda elevado (57%). No ortofotomosaico da banda RE, na área A os erros encontrados não variaram com a configuração *Diffuse* ou *total*, onde obteve-se EAM baixo ($0,02 \pm 0,02$) e ERM também baixo (10%); já na área B, observou-se uma variação com a troca de configurações do painel, onde os melhores resultados foram alcançados com a configuração de reflectância total, que apresentou EAM baixo ($0,02 \pm 0,02$), com ERM também baixo (12%). Na banda espectral do NIR, na área A, não houve mudanças de valores com a troca de configurações, onde observou-se EAM de $0,07 \pm 0,05$ e ERM de 22%; na área B, os resultados mais acurados foram obtidos com a configuração *Diffuse*, que apresentou EAM de $0,14 \pm 0,05$, com ERM de 76%. Os menores erros para os IVs foram observados para a configuração *Diffuse*, nas duas áreas, onde o NDVI da área A apresentou EAM de $0,18 \pm 0,09$ e ERM de 28%; já na área B os erros foram um pouco menores para o mesmo IV, onde obteve EAM de $0,09 \pm 0,07$ e ERM de 12%. No NDRE da área A foram observados erros consideráveis (EAM= $0,10 \pm 0,02$; ERM=59%), da mesma forma que para a área B de estudo (EAM= $0,13 \pm 0,03$; ERM=62%).

A localização e magnitude dos erros absolutos (EA) de NDVI e NDRE do ortofotomosaico obtido a partir da correção radiométrica com o subpainel *Light Gray* estão representadas nos mapas temáticos da Figura 12.

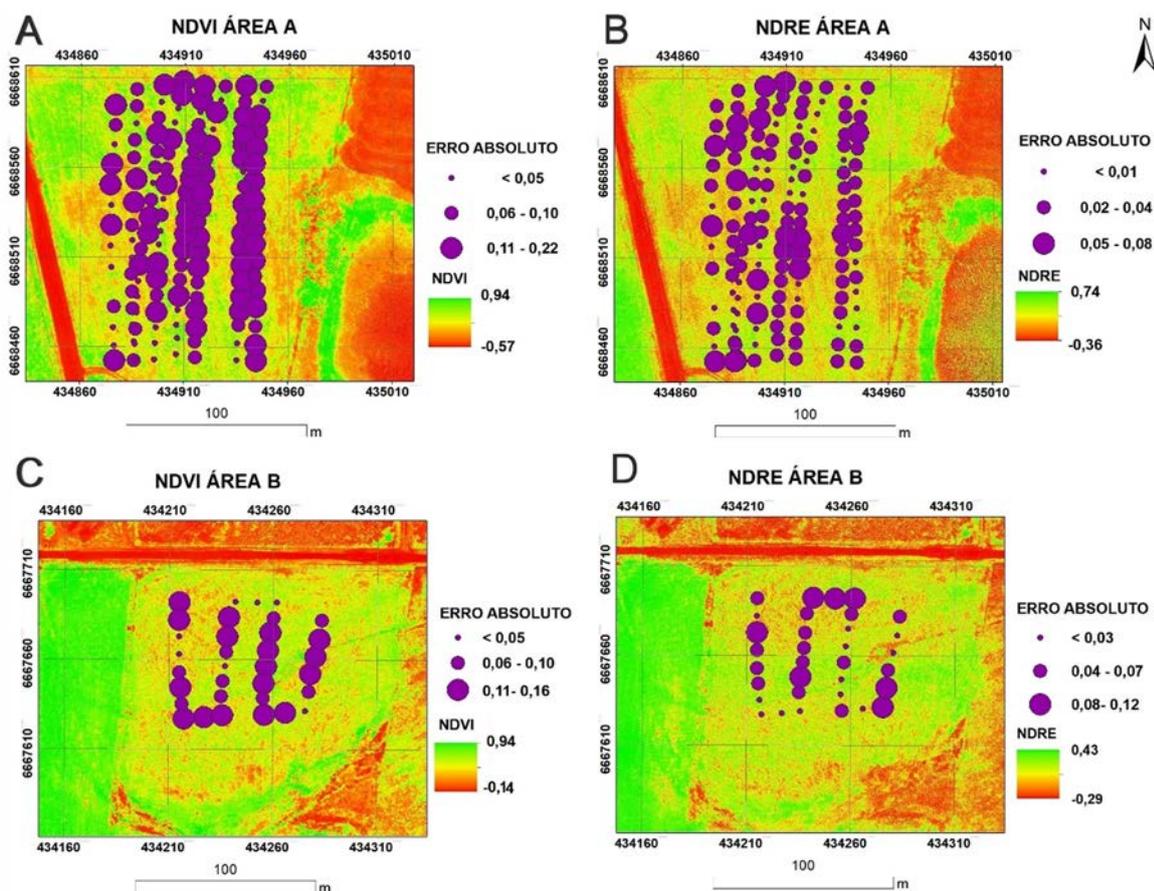


Figura 12 – Distribuição e magnitude dos erros absolutos dos ortofotomosaicos NDVI e NDRE, gerados a partir do subpainel *Light Gray* do painel de calibração de reflectância Mapir V2, sobre os pontos de coleta do Crop Circle: (A) ortofotomosaico de NDVI da área A; (B) NDRE da área A; (C) NDVI da área B; (D) NDRE da área B.

O ortofotomosaico de NDVI da área A (Figura 12A) apresentou variação máxima de erro absoluto (EA) de 0,11 a 0,22, que representam 68% das classes temáticas, com sua concentração maior a leste. Esses EAs apresentaram média correlação linear com valores de NDVI dessa imagem (0,46); já para o ortofotomosaico do NDRE (Figura 12B) o intervalo de valor máximo de EA foi de apenas 0,05 a 0,08, com um percentual de apenas 14%, com correlação linear negativa (-0,54) com os valores de NDRE. No ortofotomosaico de NDVI da área B (Figura 12C), os EAs mais frequentes obtiveram uma variação de 0,11 a 0,16, representando 52% dos erros. Para este conjunto de dados, observou-se uma alta correlação (0,86) com os EAs, o que indica que os erros aumentaram nas áreas com maior NDVI e, consequentemente, com maior biomassa vegetal e IAF. Já o ortofotomosaico de NDRE da área B (Figura 12D) apresentou alta correlação linear negativa (-0,85) com esses erros.

A Figura 13 descreve as relações dos valores de NDVI e NDRE obtidos a partir das medidas diretas feitas pelo sensor Crop Circle e as do ortofotomosaico com maior precisão radiométrica, calibrado pelo subpainel *Light Gray* do PR Mapir V2.

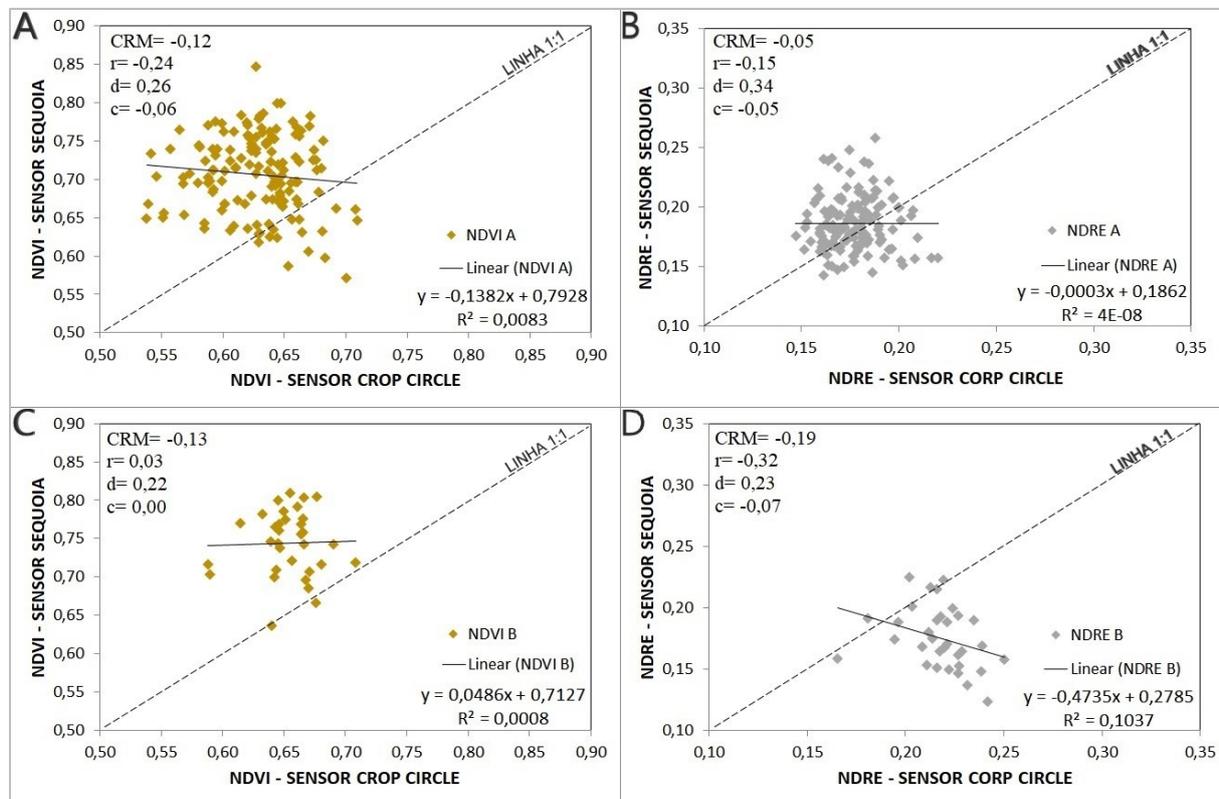


Figura 13 – Relações entre os valores de NDVI e NDRE mensurados a partir do sensor Crop Circle e do ortofotomosaico gerado com dados do subpainel *Light Gray* do painel de calibração de reflectância Mapir V2: (A) relação dos valores de NDVI da área A; (B) NDRE da área A; (C) NDVI da área B; (D) NDRE da área B.

A Figura 13 descreve a distribuição e relações entre os valores de NDVI e NDRE obtidos a partir das medidas diretas feitas pelo sensor Crop Circle e dos valores desses índices derivados do ortofotomosaico com maior precisão radiométrica, calibrado pelo painel *Light Gray* do PR Mapir V2. Nas áreas A e B foram obtidos valores negativos de CRM, respectivamente de -0,12 e -0,13, os quais indicam a subestimação dos valores de NDVI no ortofotomosaico. Para o NDVI da área A o coeficiente de correlação r também apresentou valores negativos e próximos de zero ($r = -0,24$); já para o NDVI do ortofotomosaico da área B os valores foram positivos e próximos de zero ($r = 0,03$) indicando baixa correlação entre as variáveis em ambas as áreas. Para o índice de concordância “ d ” na área A de estudo, os valores encontrados

foram próximos de zero ($d = 0,26$); na área B os resultados obtidos foram semelhantes ($d = 0,22$). O indicador de confiança c encontrado para o NDVI nas duas áreas teve valores baixos: $c = 0,06$ (área A) e $c = 0,00$ (área B), indicando um baixo desempenho do modelo linear.

Em relação ao NDRE, na área A ocorreu baixo valor de CRM ($-0,05$), que foi maior para os dados da área B ($-0,19$), onde esses valores negativos indicaram subestimação dos valores desse índice no ortofotomosaico. O coeficiente de correlação r para o NDRE de ambas as áreas apresentou valores negativos e próximos a zero (área A com $r = -0,15$; área B com $r = -0,32$). Já o índice de concordância d indicou alta discrepância entre os valores obtidos pelo sensor Crop Circle em relação aos dados do sensor Sequoia, para as duas áreas de estudo (área A com $d = 0,34$; área B com $d = 0,23$). O indicativo de confiabilidade demonstrou baixo desempenho do modelo linear (área A com $r = -0,05$; área B com $r = -0,07$).

5.2 Avaliação da acurácia radiométrica das imagens MSI- Sentinel 2

A Figura 14 apresenta uma malha retangular que mostra a localização dos pixels das imagens MSI-Sentinel 2 sobre a composição colorida RGB432 dos ortofotomosaicos da Figura 9, nas duas áreas de aveia preta. A área A é coberta por 120 pixels das imagens Sentinel 2 (bandas VNIR), enquanto que a área B por 64 pixels.

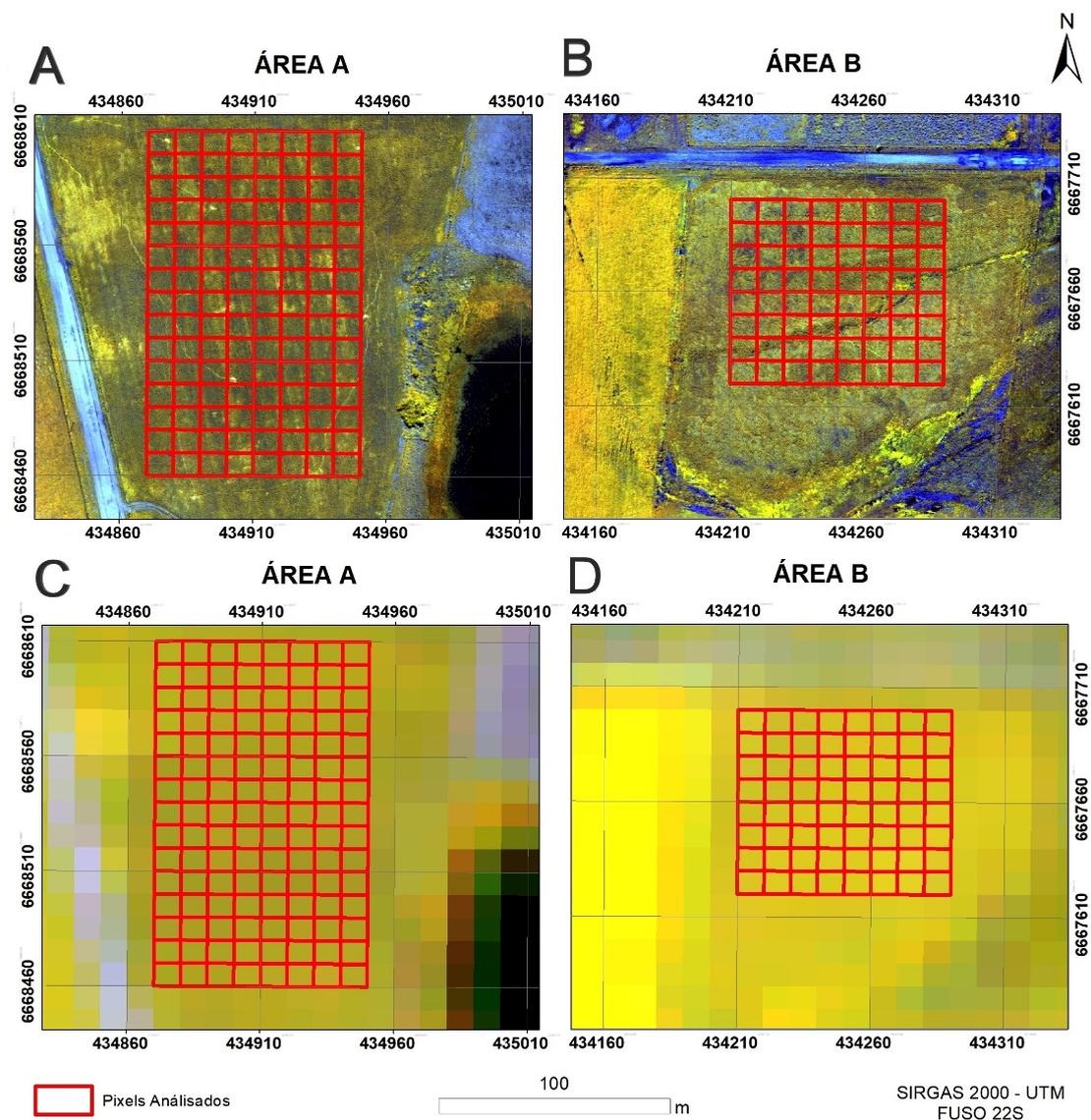


Figura 14 – (A) e (B): Malha de pixels MSI-Sentinel 2 (bandas VNIR) sobre o ortofotomosaicos da câmera Sequoia (composição colorida 432). (C) e (D): mesma malha de pixels sobre composição coloria RGB864 do sensor MSI-Sentinel 2.

Os resultados estatísticos de EAM, desvio-padrão e ERM da reflectância espectral, do NDVI e NDRE, usados na avaliação da acurácia radiométrica dos dados sem e com correção atmosférica do sensor MSI-Sentinel 2 estão apresentados graficamente nas Figura 15 e 16, para as áreas A e B.

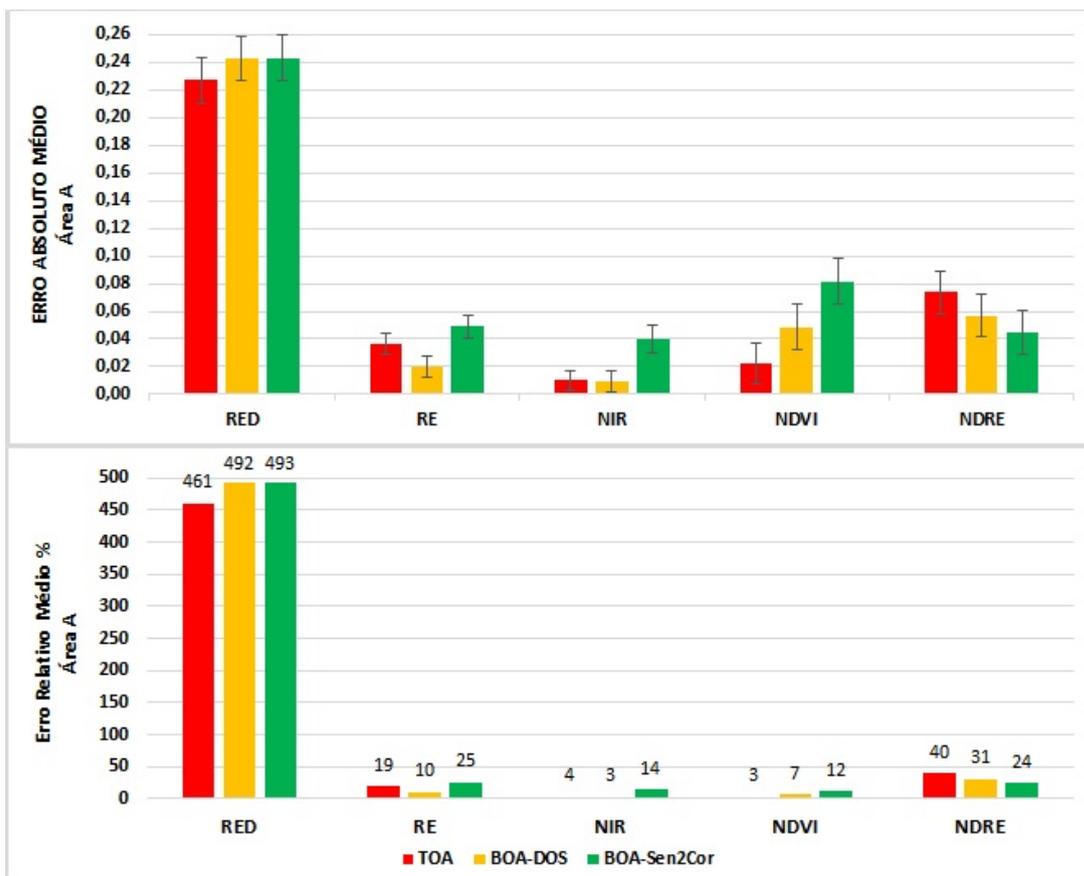


Figura 15 - Erro absoluto médio e desvio-padrão, e Erro relativo médio das imagens MSI-Sentinel 2 da área A (TOA = imagens com reflectância ao topo da atmosfera; BOA-DOS = Imagens TOA corrigidas dos efeitos atmosféricos pelo método DOS1; BOA-Sen2Cor = Imagens TOA corrigidas dos efeitos atmosféricos pelo método pelo método Sen2Cor).

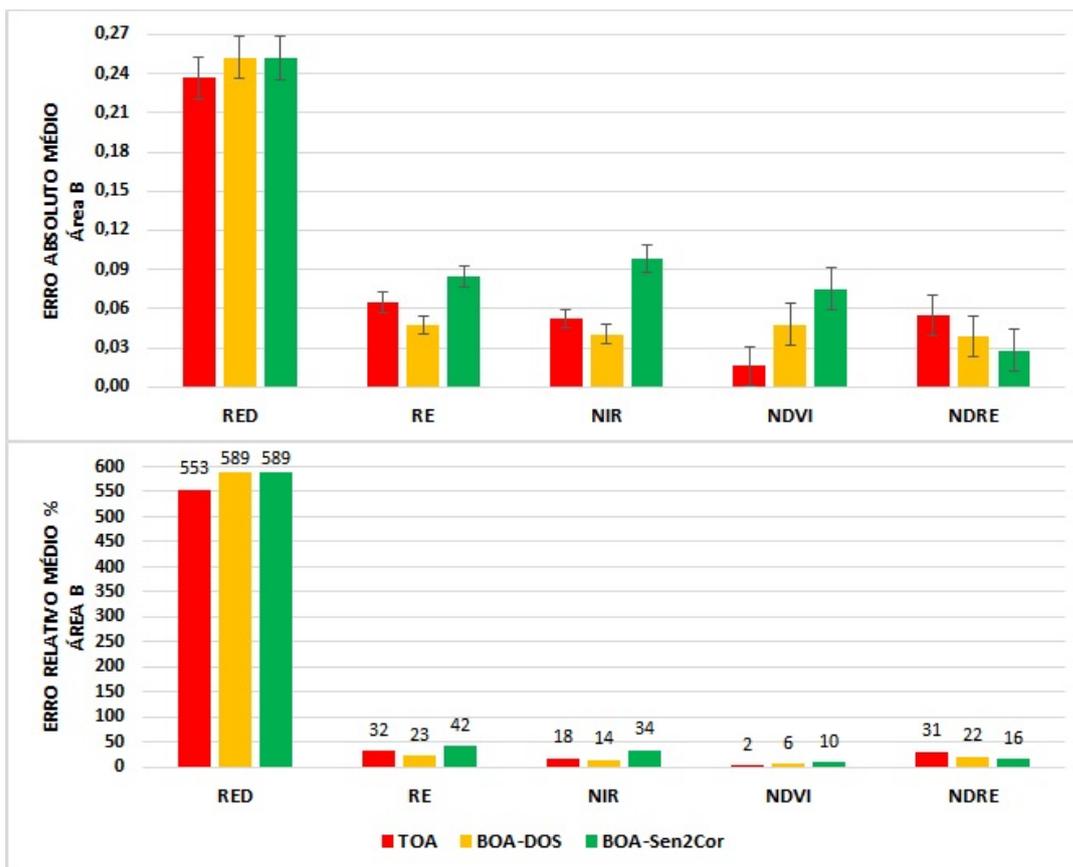


Figura 16 - Erro absoluto médio e desvio-padrão, e Erro relativo médio das imagens MSI-Sentinel 2 da área B (TOA = imagens com reflectância ao topo da atmosfera; BOA-DOS = Imagens TOA corrigidas dos efeitos atmosféricos pelo método DOS1; BOA-Sen2Cor = Imagens TOA corrigidas dos efeitos atmosféricos pelo método pelo método Sen2Cor).

A imagem da banda espectral Red do sensor MSI-Sentinel 2, de modo geral, apresentou as maiores diferenças com relação aos valores de reflectância da mesma banda do ortofotomosaico, nas duas áreas de aveia preta. Na área A foram observados altos valores de EAM e de ERM (TOA: EAM = $0,23 \pm 0,02$, ERM = 461%; BOA-DOS: EAM = $0,24 \pm 0,02$, ERM = 492%; BOA-Sen2Cor: EAM = $0,24 \pm 0,02$, ERM = 493%). Na área B também foi obtido um comportamento semelhante dos erros, com magnitude maior para as imagens BOA-DOS e BOA-Sen2Cor, que apresentaram um EAM de $0,25 \pm 0,01$ e ERM de 589%. Na imagem da banda RE os erros foram muito menores, apresentando excelentes resultados em ambas as áreas. O resultado mais acurado para esta banda espectral foi o produto gerado pelo método de correção atmosférica BOA-DOS, que na área A apresentou o menor EAM ($0,02 \pm 0,01$) e um ERM baixo, de apenas 10%. Da mesma forma na área B, com baixos EAM ($0,05 \pm 0,01$) e ERM (23%). Para as demais imagens (TOA e BOA-Sen2Cor) os EAM foram próximos para a área A (TOA: EAM = $0,04 \pm 0,01$ e ERM = 19%; BOA-Sen2Cor:

EAM = $0,05 \pm 0,01$ e ERM = 25%), Na área B foram obtidos bons resultados de acurácia radiométrica (TOA: EAM = 0,06 e ERM = 32%; BOA-Sen2Cor: EAM = 0,08 e ERM = 42%). Em relação à banda espectral do NIR, a imagem orbital teve valores de reflectância similares aos da imagem suborbital. Na área A observaram-se EAM e ER baixos (TOA: EAM = $0,01 \pm 0,01$ e ERM = 4%; BOA-DOS: EAM = $0,01 \pm 0,01$ e ERM = 3%; BOA-Sen2Cor: EAM = $0,04 \pm 0,02$ e ERM = 12%). Portanto, foram encontrados resultados mais acurados da imagem corrigida pelo método DOS. Já na área B os resultados foram semelhantes para as imagens TOA (EAM = $0,05 \pm 0,01$ e ERM = 18%) e BOA-DOS (EAM = $0,04 \pm 0,01$ e ERM = 14%), com os resultados mais acurados desta última. Porém para a imagem BOA-Sen2Cor os erros foram mais altos (EAM de $0,1 \pm 0,01$ e ERM de 34%)

A imagem de NDVI do sensor MSI-Sentinel 2, de modo geral, apresentou excelentes resultados para as duas áreas de estudos. Na área A foram obtidos EAM baixos (TOA: EAM = $0,02 \pm 0,01$ e ERM = 3%; BOA-DOS: EAM = $0,05 \pm 0,02$ e ERM = 7%; BOA-Sen2Cor: EAM = $0,08 \pm 0,02$ e ERM = 12%), Na área B os erros radiométricos foram semelhantes, com destaque para a imagem TOA, que apresentou EAM menor do que o encontrado para a área A (EAM de $0,02 \pm 0,01$ e ERM de 2%).

Para a imagem de NDRE, os EAM encontrados para ambas as áreas de estudo também apresentaram valores baixos ($< 0,08$) mas com ERM relativamente mais altos ($> 20\%$) para as imagens TOA e BOA-DOS. Na área A foram observados EAM baixos ($0,07 \pm 0,02$) para as imagens TOA. Os EAM também foram baixos para as imagens BOA-DOS ($0,05 \pm 0,02$) e BOA-Sen2Cor ($0,04 \pm 0,02$). Porém o ERM para a imagem TOA foi alto (40%), reduzindo para a imagem DOS (31%) e BOA-Sen2Cor (12%). Já na área B os EAM encontrados foram semelhantes, mantendo-se baixos (menores que 0,05). Porém, foi obtido ERM relativamente alto (31%) na imagem TOA e BOA-DOS (22%), apresentando valores baixos apenas na imagem BOA-Sen2Cor (ERM = 16%; EAM = $0,03 \pm 0,01$).

Ao analisar as bandas espectrais individualmente, os resultados mais acurados radiometricamente foram encontrados para a imagem TOA, sem correção atmosférica. Porém, para o NDVI e NDRE, os mais acurados foram observados para as imagens BOA-DOS e BOA-Sen2Cor. Como a última imagem corresponde ao produto corrigido pelo método Sen2Cor e é disponibilizado pela ESA aos usuários, optou-se por escolher esta imagem para avaliação da acurácia radiométrica dos erros absolutos (EA) do NDVI e do NDRE (Figura 17).

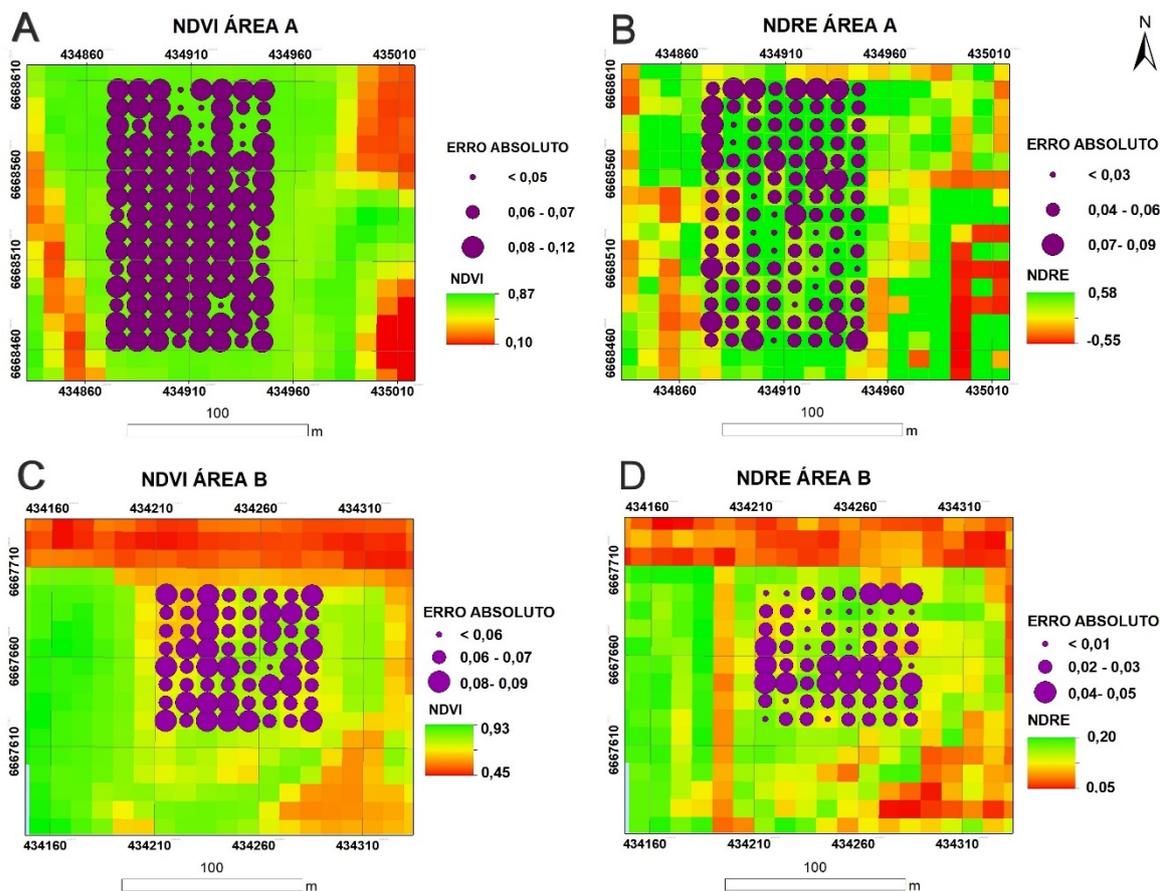


Figura 17 - Distribuição e magnitude dos erros absolutos dos NDVI e NDRE, gerados a partir da correção atmosférica Sen2Cor: (A) NDVI da área A; (B) NDRE da área A; (C) NDVI da área B; (D) NDRE da área B.

Na área A, o NDVI gerado a partir das imagens BOA-sen2Cor (Figura 17A) apresentou EA com variação máxima de 0,08 a 0,12, que corresponde a 86% dos pixels analisados. Estes EAs apresentaram correlação linear de -0,79 com os valores de NDVI da imagem. Já para o NDRE da mesma área (Figura 17B), ocorreram valores baixos de EAs (< 0,09). Estes EAs encontram-se distribuídos mais ao norte da área A, sendo que as variações máximas dos EAs (0,07-0,09) representam apenas 16% dos pixels. Nestes dados foi observado uma correlação linear de 0,66 dos EAs com o aumento do NDVI na área de estudo.

Na área B, os EAs encontrados para o NDVI foram menores que 0,09 (Figura 17C), sendo que os valores de EAs de 0,06-0,09 representam 99% dos pixels analisados. Para estes conjuntos de dados, a correlação linear observada foi negativa (-0,12). Da mesma forma, os valores de EAs da imagem NDRE (Figura 17D) também foram baixos (< 0,05), com maior representatividade na classe de 0,02 a 0,03, presente em 52% dos pixels.

A Figura 18 apresentada a seguir, tem como finalidade descrever as relações entre os valores de NDVI e NDRE obtidos a partir do ortofotomosaico calibrado com o subpainel *Light Gray*, e os valores dos mesmos índices obtidos pelo MSI calibrados pelo algoritmos Sen2Cor.

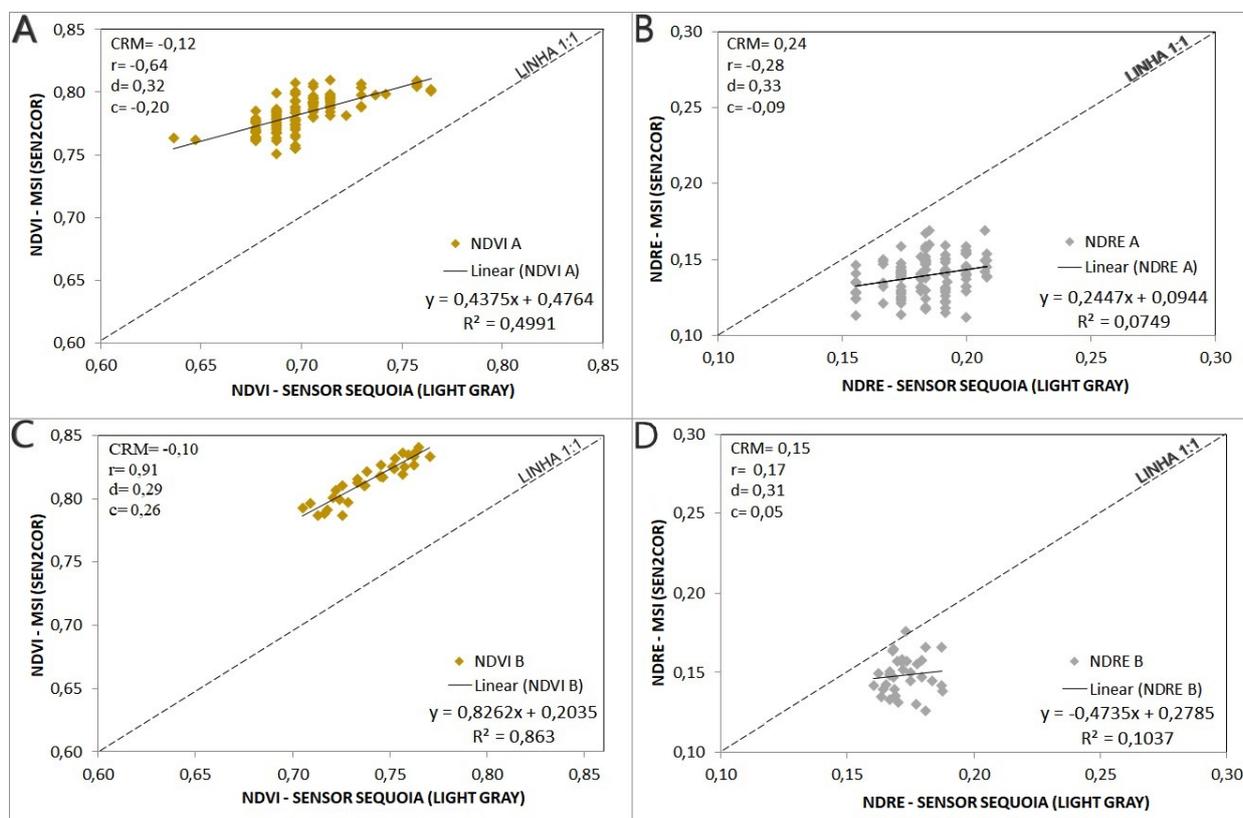


Figura 18 - Relações entre os valores de NDVI e NDRE mensurados a partir do ortofotomosaico gerado com dados do subpainel *Light Gray* do painel de calibração de reflectância Mapir V2 em relação aos valores obtidos das imagens Sentinel 2 MSI, calibrados pelo algoritmos Sen2Cor: (A) relação dos valores de NDVI da área A; (B) NDRE da área A; (C) NDVI da área B; (D) NDRE da área B.

Na área A e B o CRM observado no NDVI foi negativo, respectivamente de -0,12 e -0,10, indicando a subestimação dos valores desse índice no produto Sen2Cor. Para o NDVI da área A o coeficiente de correlação r apresentou valor -0,64; já para o NDVI na área B o r foi igual a 0,91, indicando alta correlação entre as variáveis. Nesse IV o índice de concordância “d” na área A foi de 0,32, ao passo que na na área B foi de 0,29. O indicador de confiança c encontrado para o NDVI nas duas áreas apresentou valores baixos: $c = 0,20$ (área A) e $c = 0,26$ (área B), indicando um baixo desempenho do modelo de regressão linear.

Em relação ao NDRE, na área A ocorreu um baixo valor de CRM (0,24), ainda assim, este foi maior do que o encontrado na área B (0,15). Esses valores positivos indicam superestimação do NDRE nas imagens MSI Sen2Cor. O coeficiente de correlação r para o NDRE na área A apresentou valor baixo e negativo (área $r = -0,28$); já na área B este foi positivo, mas ainda assim próximo de zero (com $r = 0,31$). Já o índice de concordância d indicou alta discrepância entre os valores obtidos pelo ortofotomosaico calibrado pelo subpainel *Light Gray* em relação aos dados do MSI calibrados pelo algoritimos Sen2Cor, para as duas áreas de estudo (área A com $d = 0,33$; área B com $d = 0,31$). O indicativo de confiabilidade demonstrou baixo desempenho (área A com $r = -0,09$; área B com $r = 0,05$).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As condições meteorológicas na área de estudo, no dia dos levantamentos com o Crop Circle e Sequoia-Matrice 100 (4 de outubro de 2018) e da aquisição da imagem multiespectral pelo sensor MSI-Sentinel 2 (5 de outubro de 2018) foram similares, conforme dados da Tabela 4: sem qualquer precipitação de chuva, baixa variação da umidade relativa do ar (5,3%) e da radiação solar local (de apenas 424,8 MJ.m⁻²). Não foram *observadas in loco* nuvens sobre a área de estudo durante a aquisição dos dados terrestres, suborbitais e orbitais.

Ainda que as condições meteorológicas tenham sido similares, existem diversas fontes de erros sistemáticos entre as medidas dos diferentes sensores utilizados, resultantes das características desses sensores e de sua operação, tais como o modo de coleta da REM (o primeiro é um sensor ativo e os demais são passivos), do FOV de cada sensor e da geometria de visada (altura e ângulo de aquisição), da sensibilidade radiométrica dos detectores e da largura das bandas espectrais, assim como da influência de fatores externos, como mudanças na geometria de iluminação e da intensidade solar (pelo Sol e influência de cobertura de nuvens) ao longo da coleta dos dados, ou mesmo de mudanças das características dos alvos entre as duas medições, como no pisoteamento das plantas durante o experimento.

Os erros absoluto e relativo médios na banda espectral Red provavelmente ocorreram devido à diferença da largura da banda espectral entre os sensores, pois, ao contrário do Crop Circle e Sentinel 2, o sensor Sequoia pode registrar processos de absorção da clorofila B em 642 nm. O mesmo pode ocorrer para a banda espectral do RE e NIR, uma vez que a larguras de bandas se diferem, fazendo com que os detectores dos sensores se sensibilizem mais ou menos de acordo com os pigmentos fotossintetizantes, para as bandas do Red e RE, e com as características do mesófilo, para a banda do NIR. Outro fator importante é a diferença do FOV e altura de aquisição desses sensores, pois o sensor orbital abrange maior área amostrada em cada campo de visada e é mais sensível ao IAF, que tem influência no processo de absorção da radiação do vermelho pelas plantas. Esses erros foram relativamente menores na banda do NIR, na qual além do IAF, devem-se considerar os processos de espalhamento da REM no mesófilo.

Além de todos esses fatores, outra fonte de erro sistemático está relacionada a problemas de correção entre os dados do Crop Circle e dos sensores imageadores utilizados. Para a avaliação dos ortofotomosaicos é requerida uma precisão centimétrica dos pontos de coleta radiométrica e de apoio de pré-sinalizações no terreno, assim como dos ortofotomosaicos. Para tanto, é necessário o uso de receptores GNSS de dupla frequência e da aplicação de métodos precisos para o processamento desses dados georreferenciados, como foi realizado neste estudo. Pode-se aplicar o método relativo pós-processado, usando dados de uma base instalada, como no levantamento deste estudo, ou fazer correções das coordenadas dos pontos em tempo real, com o uso de receptores RTK e PPK, também de dupla frequência. Para a obtenção de ortofotomosaicos precisos com os GCPs geodésicos, recomenda-se aplicar os métodos fotogramétricos SIFT, SFM e MVS.

Neste experimento, os ortofotomosaicos gerados sem qualquer calibração radiométrica apresentaram erros significativos para as bandas espectrais Red, RE e NIR, assim como para o NDVI e NDRE. Ainda que tenha melhorado a acurácia radiométrica do ortofotomosaico, não recomenda-se usar apenas os dados do sensor de irradiância solar (SS) na calibração radiométrica das imagens do Sequoia, para a medição das reflectâncias nessas bandas espectrais mas somente para o cálculo dos índices NDVI e NDRE, que mostraram-se acurados em razão do comportamento proporcional dos erros nas bandas usadas no seu cálculo.

O uso de uma painel de calibração de reflectância é fundamental em trabalhos que requerem alta precisão radiométrica dos dados. Os subpainéis da painel de calibração de reflectância MAPIR V2, ao serem usados na calibração radiométrica das ortofotos do Sequoia, resultaram em ortofotomosaicos com boa acurácia radiométrica, especialmente os subpainéis *Dark Gray* e *Light Gray*. Neste experimento, com o uso do tempo exposição 1/2933.32 s, o melhor resultado obtido foi com o subpainel *Light Gray*. Isso pode ter ocorrido devido às características do baixo brilho e contraste da imagem tomada pelo sensor para a calibração radiométrica, que acabou por saturar os subpainéis mais escuros.

As imagens do produto MSI-Sentinel 2 level 1C, com reflectância TOA, sem correção atmosférica, ou com reflectância BOA, obtida pelos métodos DOS e Sen2Cor (level 2A), apresentaram erros significativos para a banda espectral Red. Esse maior erro poderia ser explicado pela sensibilidade ao pigmento clorofila B em 642 nm, que pode ser detectado somente na banda Red do sensor Sequoia e não na do MSI. A

imagem BOA-DOS teve maior acurácia radiométrica nas bandas RE e NIR. O valor máximo de EAM da imagem da banda RE foi de $0,08 \pm 0,01$ e na banda NIR de $0,10 \pm 0,01$.

A imagem de NDVI com maior acurácia radiométrica foi obtida com a imagem com reflectância TOA ($EAM = 0,02 \pm 0,01$), ao passo que a de NDRE mais acurada foi a com a imagem resultante da aplicação do método Sen2Cor ($EAM = 0,03 \pm 0,01$). Esta última é um produto fornecido pela Agência Espacial Européia (ESA) e nesta análise a imagem NDVI apresentou Erro Absoluto (EA) predominante da classe 0,08 a 0,12 (86 % dos pixels MSI).

Em geral, o método de correção atmosférica Sen2Cor obteve resultados radiométricos satisfatórios. No entanto, a implementação desta ferramenta computacional e sua devida configuração exigem conhecimentos específicos, o que dificulta sua utilização. Por essa razão, a ESA disponibiliza imagens MSI-Sentinel 2 desses produtos (Level 2A), com atenuação dos efeitos de absorção e espalhamento da REM causados pela atmosfera. Em contrapartida, a imagem obtida com a aplicação do método de correção atmosférica DOS obteve acurácia próxima a do Sen2Cor para o cálculo do NDVI e NDRE, e devido sua facilidade de implementação, recomenda-se o uso desse método para a correção de imagens MSI-Sentinel 2, para análises radiométricas e multitemporais de áreas de aveia preta que estão no estágio fenológico do início do florescimento (fase 60).

Outros métodos de correção atmosférica do produto TOA do sensor MSI poderiam ter sido aplicados para a avaliação da acurácia radiométrica, tais como os dos Modelos de Transferência Radiativa ModTran (por exemplo, implementados no FLAASH do software Envi) ou o 6S (*Second Simulation on the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) mas neste estudo optou-se por avaliar somente os métodos mais utilizados na correção atmosférica dos produtos MSI, como o DOS e Sen2Cor.

Considerando o EAM das bandas Red, RE e NIR, outros índices espectrais poderiam ser avaliados em estudos futuros, além do NDVI e NDRE, tais como a razão simples (BIRTH; MCVEY, 1968; HUETE; JACKSON, 1987); Índice de Vegetação por Diferença Renormalizada (ROUJEAN; BREON, 1995); Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (HUETE, 1988); Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Otimizado (RONDEAUX; STEVEN; BARET, 1996); Índice Não-linear (GOEL; QIN, 1994); e o Índice de Vegetação de Percentagem do Infravermelho (CANDIAGO et al., 2015).

REFERÊNCIAS

- ABREU, K. M. P. De; COUTINHO, L. M. Remote sensing applied to the study of vegetation with emphasis on index of vegetation and landscapes metrics. **Revista Vértices**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 173–198, 2014. Disponível em: <<http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/1809-2667.20140012>>
- ANDRADE, N. O. **Aveia como forrageira de inverno**, 1992.
- BAIER, A. C.; FLOSS, E. L.; AUDE, M. I. S. **As lavouras de inverno - 1**, 1988.
- BAILLARIN, S. J. et al. Sentinel-2 level 1 products and image processing performances. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, [s. l.], v. XXXIX, n. September, p. 7003–7006, 2012. September.
- BARNES, E. . et al. Status and Canopy Density Using Ground-Based. **Water**, [s. l.], v. 37, n. 5, p. [CD Rom], Proceedings of the Fifth International C, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V03-4XPB6WG-4/2/e3842d0d34d1460977c698f1bb31d99a>>
- BARROS, V. L. N. Aveia Preta - Alternativa De Cultivo No Outono/Inverno. **Pesquisa & Tecnologia**, [s. l.], 2013.
- BERGAMASCHI, H. et al. **Boletins agrometeorológicos da estação experimental agrônômica da UFRGS: Série histórica 1970-2012**. 2013. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/agronomia/joomla/files/EEA/Srie_Meteorolgica_da_EEA-UFRGS.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2018.
- BIRTH, G. S.; MCVEY, G. R. Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer1. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 60, n. 6, p. 640, 1968.
- BUZZFLYER UK. **DJI Matrice 100 USER MANUAL**. 2017. Disponível em: <http://www.buzzflyer.co.uk/DJI-Professional/DJI-Matrice-100__p-205-2858.aspx>. Acesso em: 14 mar. 2018.
- CANDIAGO, S. et al. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. **Remote Sensing**, [s. l.], 2015.

CASTRO JORGE, L. A.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.**, [s. l.], p. 596, 2014.

CHAVES, MICHEL; MATAVELI, GUILHERME; GUERRERO, JOÃO; JUSTINO, R. Análise comparativa do NDVI estimado a partir de valores de níveis digitais originais e de reflectâncias aparente e de superfície. [s. l.], n. April 2013, 2015.

CHAVEZ, J. P. S. Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, [s. l.], v. 62, p. 1025–1036, 1996.

CHAVEZ, P. S. An improved *Dark-object* subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 459–479, 1988.

DAMIAN, J. M. **ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) PARA DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO E MONITORAMENTO DA VARIABILIDADE DA SUCESSÃO AVEIA PRETA/SOJA**. 2017. Universidade federal de Santa Maria, [s. l.], 2017.

EDUARDO, B. F. S.; SILVA, A. J. F. M. e S. Avaliação da influência da correção atmosférica no cálculo do índice de vegetação NDVI em imagens Landsat 5 e RapidEye. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, [s. l.], p. 1442–1449, 2013.

EMBRAPA, (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Sistema Brasileiro De Classificação De Solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**, Rio de Janeiro, p. 412, 1999.

ESA. **ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services**. [s.l.] : ESA Communications, 2012. Disponível em:
<https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf>

ESA. **SENTINEL-2 User Handbook**. [s.l: s.n.].

ESA, (Agência Espacial Europeia). **Satellite Description**. 2015b. Disponível em:

<<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/satellite-description>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

FONTANELI, R. S.; PEREIRA, H. Gramíneas forrageiras anuais de inverno. [s. l.], p. 127–172, 1982.

FONTANELI, R. S.; PIOVEZAN, A. J. **Efeito De Cortes E Rendimento Em Aveia.Pdf**, 1991.

GOEL, N. S.; QIN, W. Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and FPAR: a computer simulation. **Remote Sensing Reviews**, [s. l.], 1994.

GROSS, J. **Pigments in Vegetables Chlorophylls and Carotenoids**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], 1988.

HUETE, A. R.; JACKSON, R. D. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], 1987.

INAMASU, R. Y. et al. **Agricultura de Precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos do agronegócio brasileiro**. 2011. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/923976/1/Proci11.00287.PDF>>. Acesso em: 22 fev. 2018.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. [s.l: s.n.].

JUNIOR, A. M. **GEOESTATÍSTICA NA AVALIAÇÃO DE TEOR DE CLOROFILA EM AVEIA PRETA Botucatu**. 2018. Universidade Estadual Paulista “Julia de Mesquita Filho”, [s. l.], 2018.

KAUFMAN, Y. J. et al. MODIS 2.1- μm channel - correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 1286–1298, 1997.

KUNTSCHIK, G. **Estimativa de biomassa vegetal lenhosa em cerrado por meio de sensoriamento remoto óptico e de radar** Gerardo Kuntschik **Estimativa de biomassa vegetal lenhosa em cerrado por meio de sensoriamento remoto óptico e de radar**. 2004. Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde-14012005-084048/pt-br.php>>

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=YNEtCQAAQBAJ>>

LUCHE, H. de S.; NORBERG, R.; OLIVEIRA, A. C. Desenvolvimento da Planta. In: **Indicações técnicas para cultura da aveia**. Passo Fundo-RS: XXXIV Reunião de Comissão Brasileira de Pesquisa da Aveia Fundação ABC, 2014. p. 54–62.

MAYER, B.; KYLLING, A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 1319–1381, 2005. Disponível em: <<http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/5/1319/2005/>>

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. De. Introdução ao processamento de imagem de sensoriamento remoto. **Cnpq/Unb**, [s. l.], p. 266, 2012.

MIURA, T.; HUETE, A.; YOSHIOKA, H. An empirical investigation of cross-sensor relationships of NDVI and red/near-infrared reflectance using EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 100, n. 2, p. 223–236, 2006.

MORI, C. De; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da aveia. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, [s. l.], p. 26, 2012. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/969149/1/2013documentosonline142.pdf>>

OGAYA, R.; PEÑUELAS, J. Comparative field study of *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*: Photosynthetic response to experimental drought conditions. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 137–148, 2003.

PARROT. **Datasheet Specs sheet Sequoia : the multi-band sensor designed for agriculture**. 2018a. Disponível em: <www.parrot.com>. Acesso em: 11 maio. 2018.

PARROT. **Sensor Parrot Sequoia**. 2018b. Disponível em:

<<https://www.parrot.com/business-solutions-uk/parrot-professional/parrot-sequoia>>.

Acesso em: 16 mar. 2018.

PEREIRA, S. et al. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA DE PRECISÃO NO CULTIVO DE BAMBU. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, p. 8–33, 2016.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. **Sensoriamento remoto reflectância de alvos naturais**, [s. l.], v. 06, n. 2011 Ii, p. 157–199, 2001. Disponível em: <<http://www.agrosoft.org.br/agropag/27483.htm>>

RICHTER, R.; LOUIS, J.; BERTHELOT, B. . Sentinel-2 MSI – Level 2A Products Algorithm Theoretical Basis Document. **European Space Agency, (Special Publication) ESA SP**, [s. l.], v. 49, n. 0, p. 1–72, 2012. 0.

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], 1996.

ROUJEAN, J. L.; BREON, F. M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], 1995.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. **Progress Report RSC 1978-1**, [s. l.], 1973.

SÁ, J. P. G. Utilização Da Aveia Na Alimentação Animal. **Circular 87, IAPAR**, [s. l.], p. 20 p, 1995.

SANTOS, O. L. Dos; PANDOLFI, A. S.; RAMALDES, G. P. Análise De Índice De Vegetação Através De Imagens Obtidas Por Vant. **Revista Científica Faesa**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 142–162, 2019.

SCIENTIFIC, H. Crop Circle Acs-430 Active Crop Canopy Sensor Features : . 2012.

SHIRATSUCHI SHOZO, L. et al. Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**, [s. l.], p. 58–73, 2014. Disponível em:

<<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114687/1/Agricultura-de-precisao-cap.4.pdf>>

SILVA, M.; ANDRADE, A. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE. **Anais XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE**, [s. l.], n. 1986, p. 6917–6922, 2013.

TURRA, M. A. **MANEJO DO NITROGÊNIO EM CULTIVARES DE TRIGO BASEADO NO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)**. 2016. Programa de Pós-graduação em Fitotecnia- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [s. l.], 2016.

WILM, UWE, M. et al. Sentinel-2 Level 2a Prototype Processor : Architecture , Algorithms and First Results. **ESA Living Planet Symposium 2013, Edinburgh, UK**, [s. l.], v. 2013, n. December, p. 3–10, 2013.

ZADOKS, J.; CHANG, T.; KONZAK, C. A decimal growth code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, [s. l.], 1974.