



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.11.02.49-TDI

## **AVALIAÇÃO DO USO DE SENSOR TERMAL A BORDO DE VANT ATRAVÉS DE ANÁLISES RADIOMÉTRICAS, ESPECTRAIS, ESPACIAIS E POSICIONAIS**

Luana Thayza de Oliveira

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelo Dr. Hermann Johann Heinrich  
Kux, aprovada em 15 de maio de  
2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NS677H>>

INPE  
São José dos Campos  
2017

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

## **COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):**

### **Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

### **Membros:**

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.11.02.49-TDI

## **AVALIAÇÃO DO USO DE SENSOR TERMAL A BORDO DE VANT ATRAVÉS DE ANÁLISES RADIOMÉTRICAS, ESPECTRAIS, ESPACIAIS E POSICIONAIS**

Luana Thayza de Oliveira

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelo Dr. Hermann Johann Heinrich  
Kux, aprovada em 15 de maio de  
2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NS677H>>

INPE  
São José dos Campos  
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

- Oliveira, Luana Thayza de.
- Ol4a      Avaliação do uso de sensor termal a bordo de VANT através de análises radiométricas, espectrais, espaciais e posicionais / Luana Thayza de Oliveira. – São José dos Campos : INPE, 2017.  
xxvi + 131 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.11.02.49-TDI)
- Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.  
Orientador : Dr. Hermann Johann Heinrich Kux.
1. Termal. 2. VANT. 3. Caracterização de sensores. 4. Exatidão posicional. I.Título.

CDU 528.835:543.4

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Luana Thayza de Oliveira*

Título: "AVALIAÇÃO DO USO DE SENSOR TERMAL A BORDO DE VANT ATRAVÉS DE ANÁLISES RADIOMÉTRICAS, ESPECTRAIS, ESPACIAIS E POSICIONAIS"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **Sensoriamento Remoto**

Dra. Claudia Maria de Almeida



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Thales Sehn Körting



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Ruy Morgado de Castro



Convidado(a) / IEAV/CTA / São José dos Campos - SP

**Este trabalho foi aprovado por:**

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 15 de maio de 2017



*“Por isso eu pergunto  
A você no mundo  
Se é mais inteligente  
O livro ou a sabedoria”.*

*Gentileza - Marisa Monte*



*Ao Sebastião Faustino de Oliveira (in memoriam).*  
*Pelo adeus que não pude dar.*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao programa de pós-graduação em Sensoriamento Remoto do INPE e ao meu orientador Dr. Hermann J. H. Kux pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa em uma instituição de tão alta qualidade e seriedade. Ao meu orientador agradeço especialmente pelo apoio em todas as fases de execução deste trabalho, pelas conversas e conhecimentos compartilhados.

Ao Dr. Ruy Morgado de Castro do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) por, além de abrir as portas do LaRaC para a execução das etapas laboratoriais desta pesquisa, partilhar do seu conhecimento com paciência e boa vontade. Agradeço também pela participação na banca de defesa e pelas contribuições oferecidas.

Agradeço à Dra. Claudia Maria de Almeida e ao Dr. Thales Körting, também integrantes da banca de defesa; e à Dra. Leila Fonseca e Dr. Egídio Arai constituintes da banca de proposta, por se mostrarem solícitos em contribuir para a melhoria deste trabalho.

Agradeço ao CNPq pelo auxílio financeiro prestado durante esses dois anos de pesquisa.

Ao Sr. Elson de Paiva diretor da Zenz Automação, representante da empresa alemã OPTRIS no Brasil, agradeço por ter cedido, gentilmente, o sensor OPTRIS PI450 para a execução desta pesquisa.

À Dra. Elisabete Caria de Moraes pela cessão temporária do sensor FLIR A320 de propriedade do Laboratório de Radiometria (LARAD) do INPE, também utilizado nesta pesquisa.

Aos Ms. Alessandro Mendes e Ms. Helosman Figueiredo do Laboratório de Robótica e Veículos Autônomos (LRVA) da Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), por fornecer o VANT utilizado nesta pesquisa, bem como o vosso precioso tempo para a adaptação, configuração do sistema embarcado e pilotagem na execução do experimento. Agradeço também à UNIVAP por permitir a coleta de dados dentro do Campus.

Ao Dr. Fábio Furlan do INPE pelo empréstimo dos *corner reflectors* e aos funcionários da oficina deste mesmo Instituto pela confecção das demais placas de alumínio utilizadas em campo.

Ao Major Engº Leandro Roberto e ao Engº Fabiano Nogueira pelo fornecimento do ortomosaico de referência, dos dados GNSS de campo e pelo compartilhamento de conhecimentos estatísticos e cartográficos.

À Carlyne Bueno Machado pelo apoio prestado durante a execução do trabalho de campo. Mais do que isso, agradeço por dividir comigo essa jornada de mestrado, por dividir a sala 35 do ASA, a casa, a carona, o jantar, o café, as tristezas e alegrias. Grande amiga!

Aos amigos da PG-SER/ INPE turma 2015 pelos cafés, churrascos e trocas de conhecimento. Aos amigos que (temporariamente) foram deixados em Londrina-PR agradeço por tornarem a vida mais leve e divertida, mesmo à distância. Agradeço especialmente às parceiras de sempre: Fabiana, Paulinha, Isabelle, Cíntia, Natália e Camila.

A meus pais Sirlene e Amarildo, minha irmã Thamilis e, aos mais doces sobrinhos que alguém pode ter: Cloe e Murilo. (Vocês são o motivo da minha caminhada. Obrigada por se fazerem presentes mesmo de longe. Meu amor e gratidão infinita a vocês).

A meu noivo e melhor amigo, Lucas Yoshimi Endo (Tem sido um presente compartilhar a vida com alguém tão especial como você. Obrigada por compreender, respeitar e apoiar minhas escolhas. Te amo).

Gratidão ao sopro de vida que me foi dado porque dele cheguei até aqui.

## RESUMO

Dados obtidos na região do infravermelho termal (*Thermal Infrared* - TIR) podem revelar informações não visíveis importantes sobre os alvos observados. Tais dados têm aplicações nas mais diversas áreas de monitoramento, seja ambiental, urbano ou agrícola. Contudo, sua larga utilização esbarra em alguns desafios: há poucos sensores orbitais operacionais disponíveis que atuam no TIR. E, dentre os sistemas TIR existentes, precisa ser ainda considerada a sua limitação quanto à frequência de imageamento e resolução espacial. Assim, o uso de sistemas de sensores infravermelhos termais a bordo de aeronaves e, mais recentemente, em veículos aéreos não tripulados (VANTs) tem sido crescente. Em contrapartida, poucos estudos têm explorado as características dos sensores aplicados nestas missões e tampouco a acurácia dos dados obtidos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as capacidades radiométricas, espectrais e espaciais de dois sensores termais comerciais, um deles desenvolvido para a integração em plataformas não tripuladas, bem como avaliar exatidão posicional dos produtos resultantes do seu uso em um VANT, ortomosaico termal e modelo de superfície (MDS), segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Para tanto, foram realizados procedimentos laboratoriais de caracterização dos dois sensores. Em campo, foi realizado levantamento de dados termais utilizando um VANT multirrotor quadricóptero em uma área de aproximadamente 10 mil m<sup>2</sup>, além de medições experimentais de quatro superfícies com diferentes tipos de cobertura pelos dois sensores previamente caracterizados. Dos experimentos laboratoriais de caracterização espectral, resultaram as curvas da função de reposta espectral (FRE) dos sensores, em que em ambos os casos, foi possível verificar diferenças na faixa de atuação em relação ao declarado pelos fabricantes. Na análise radiométrica um dos sensores demonstrou ter incertezas superiores às declaradas pelos fabricantes, e na caracterização espacial, os valores de EIFOV de cada um dos sensores foram obtidos. A análise dos dados obtidos em campo, além de validar as incertezas de medição determinadas em laboratório, permitiu verificar que, mesmo em baixas altitudes, a atmosfera pode exercer influência sobre os dados termais e levar a conclusões errôneas sobre os alvos, sobretudo em análises quantitativas. Da avaliação quanto à exatidão posicional, concluiu-se que o ortomosaico gerado sem pontos de controle apresenta exatidão planimétrica a partir da escala 1:5.000 e altimétrica a partir de 1:50.000, e o ortomosaico processado com 4 pontos de controle apresentou exatidão planimétrica a partir de 1:1.000 e altimétrica a partir de 1:25.000. Desde que consideradas as incertezas envolvidas no processo de obtenção das imagens termais por VANT, esta demonstrou ser uma alternativa eficaz para imageamento de áreas com características não aparentes na faixa do visível.

Palavras-chave: Termal. VANT. Caracterização de Sensores. Exatidão posicional.



# **EVALUATION OF THE USE OF A THERMAL SENSOR ON A UAV THROUGH RADIOMETRIC, SPECTRAL, SPATIAL AND POSITIONAL ANALYSIS**

## **ABSTRACT**

Data obtained in the Thermal Infrared (TIR) part of the electromagnetic spectrum may present invisible, but important, information from the targets of interest. Such data are important in the most different applications of environmental, urban and agriculture monitoring. Nevertheless there are some challenges to its wide use: presently there are few operational orbital TIR sensors available, and among those there are limitations regarding its imaging frequency and spatial resolution. Therefore the use of TIR systems aboard aircrafts, and more recently on drones is growing. On the other hand, few studies evaluated the characteristics of the TIR sensors used in such missions and neither the accuracy of the data obtained. In this frame, the objective of this study was the evaluation of the radiometric, spectral and spatial capacities of two commercial thermal sensors. One of them was developed for the integration on unmanned platforms, as well as to evaluate the positional accuracy of the resulting products for its use on a drone, a thermal ortho-mosaic and a Digital Surface Model (DSM), in accordance with the Brazilian Cartographic Accuracy Standard of Digital Cartographic Products (PEC-PCD). In order to perform these tasks, laboratory procedures were executed to characterize both sensor systems. Afterwards a field survey of thermal data was done, using a multi-rotor quadri-copter drone, at an area of approximately 10,000 m<sup>2</sup>, besides experimental measurements on four test-sites with different types of soil cover, using both previously characterized sensors. From the laboratory works on spectral characterization, frequency curves of both sensors were obtained. It was verified that there were differences in the respective performance bands, regarding what was declared by the manufacturers. The radiometric analysis from one of the sensors showed higher uncertainties than those declared, as well as at the spatial characterization of EIFOV values, from each sensor. The analysis of data obtained during the field survey, besides validating the uncertainties from the measurements in the laboratory, also showed that, even at low altitudes, the atmosphere influences thermal data and can lead to erroneous conclusions about targets, especially at a quantitative analysis. Regarding the positional accuracy, it was concluded that the ortho-mosaic obtained without ground control points, presents a planimetric accuracy at 1:5,000 scale, and an altimetry accuracy at 1:50,000. The ortho-mosaic processed with four control points presented a planimetric accuracy starting at 1:1,000 and an altimetry accuracy starting at 1:25,000. Taking into account the uncertainties involved in the process to obtain thermal images with a drone, this is an efficient alternative to image areas with non-apparent characteristics in the visible spectrum.

Keywords: Thermal Infrared. UAV. Characterization of Sensors. Positional accuracy.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – O Espectro Eletromagnético.....	7
Figura 2.2 - Exitância espectral. ....	9
Figura 2.3 - Perfis dos gases atmosféricos: a) Vapor d'água e b) CO <sub>2</sub> .....	15
Figura 2.4 - Perfil dos gases atmosféricos: a) Ozônio, O <sub>3</sub> ; e b) Metano, CH <sub>4</sub> .....	16
Figura 2.5 - Composição da radiação captada pelo sistema sensor e a influência da atmosfera. ....	17
Figura 2.6 - Componentes de um sistema sensor.....	19
Figura 2.7 - Conceito de IFOV angular e linear. ....	26
Figura 2.8 - a) Alvo padrão USAF 1951 Detalhado por um circulado em vermelho, um tribar; b) representação da obtenção das médias para cálculo de contraste; c) cálculo de pares de linhas por metro. ....	28
Figura 2.9 - Curva teórica da CTF, Modulação de imagem aérea (AIM) e Frequência de Nyquist. ....	29
Figura 2.10 - Parâmetros de orientação exterior referentes à atitude de um sensor fotogramétrico colocado em plataforma aérea. ....	31
Figura 3.1 - Kit Optris PI LightWeight (a) Microprocessador e (b) Sensor IV termal Optris PI450 LW .....	44
Figura 3.2 - Sensor FLIR modelo A310. ....	44
Figura 3.3 - Multirotor quadricóptero utilizado na coleta de imagens. ....	45
Figura 3.4 - Alvos de referência utilizados nos experimentos de campo. ....	46
Figura 3.5 – Ortomosaico e Modelo de Superfície utilizados como referência para a avaliação posicional. ....	47
Figura 3.6 - a) Globo; b) Monocromador; c) sensor de referência Judson J15D16; e d) termo-higromêtro.....	48
Figura 3.7 - Organização experimental utilizada na caracterização espectral dos sensores.....	49
Figura 3.8 - Organização experimental utilizada na caracterização espacial do sensor. ....	50
Figura 3.9 - a) Corpo Negro de Área Extensa, modelo SR800 da CI Systems; b) Corpo Negro com alvo padrão USAF 1951 acoplado, c) Visualização do <i>software</i> durante a realização da medida pelo sensor.....	50

Figura 3.10 - Relação trigonométrica para determinação do EIFOV .....	51
Figura 3.11 - Diagrama do arranjo experimental utilizado para a obtenção de medidas radiométricas. ....	52
Figura 3.12 - Arranjo experimental para a caracterização radiométrica.....	52
Figura 3.13 - Relação entre ND e temperatura radiante (°C) disponibilizada pelo fabricante. ....	53
Figura 3.14 - Localização da área de estudo.....	54
Figura 3.15 - Configuração da coleta de dados para o experimento de intercalibração radiométrica. a) Croqui (imagem sem escala real); b) Foto do experimento. ....	55
Figura 3.16 - Alvos analisados: a) calçada de concreto, b) bloquete de concreto, c) solo exposto e d) superfície com vegetação rasteira (grama). ....	56
Figura 3.17 - Composição da radiação captada pelos sistemas sensores e sequência de correções realizadas sobre os dados medidos pelos sensores.	58
Figura 3.18 - Relação entre a distância focal da câmera, tamanho do <i>pixel</i> e tamanho do GSD para cálculo de altura do voo. ....	60
Figura 3.19 - Planejamento de voo no <i>software Mission Planner</i> .....	60
Figura 3.20 - Identificação dos pontos de controle na imagem termal. ....	61
Figura 3.21 - Coleta de dados com GNSS para pontos de controle e checagem...	62
Figura 3.22- Organograma da metodologia de avaliação do PEC-PCD.....	65
Figura 4.1 - Sinal medido pelo Sensor A. ....	69
Figura 4.2 - Sinal medido pelo Sensor B. ....	69
Figura 4.3 - Curva de resposta de tensão obtida com o detector de referência Judson/LARAC (Experimento com o Sensor A). ....	70
Figura 4.4 - Curva de resposta de tensão obtida com o detector de referência Judson/LARAC. (Experimento com o Sensor B).....	70
Figura 4.5 - Curva da Função de Resposta Espectral do detector de referência Judson, para a região de interesse de 6,5 a 14 $\mu\text{m}$ . ....	71
Figura 4.6 - Curvas de resposta espectral do Sensor A (linha azul) e Sensor B (linha vermelha). ....	71
Figura 4.7 - Curva da Função de Resposta Espectral do sensor A. ....	72
Figura 4.8 - Curva da Função de Resposta Espectral do sensor B. ....	72

Figura 4.9 - Imagem obtida com o Sensor A do alvo USAF 1951, com o Corpo Negro ajustado para uma temperatura termodinâmica de 50 °C. Destaque para o 14° elemento. ....	73
Figura 4.10 - Funções de Transferência de Contraste obtidas pelo Sensor A em temperaturas de 25 a 80°C. ....	75
Figura 4.11 - Imagem obtida com o Sensor B do alvo USAF 1951, com o Corpo Negro ajustado para uma temperatura termodinâmica de 50 °C. Destaque para o 15° elemento. ....	76
Figura 4.12 - Funções de Transferência de Contraste obtidas pelo Sensor B em temperaturas de 25 a 80°C. ....	77
Figura 4.13 - a) Diferença entre valores de temperatura ajustados no CN e medidos pelo Sensor A; b) Diferença entre valores de temperatura ajustados no CN e medidos pelo Sensor B. ....	78
Figura 4.14 - Diferença entre valores de radiância do CN e radiância calculada a partir das temperaturas medidas pelos sensores: a) Sensor A e b) Sensor B. ....	79
Figura 4.15 - Radiância, calculada a partir da temperatura medida pelo Sensor A (7,5 – 13 μm) (linha azul) e calculada teoricamente a partir da temperatura do CN (linha vermelha) x temperatura ajustada no CN. ....	80
Figura 4.16 - Radiância, calculada a partir da temperatura medida pelo Sensor B (7,5 – 13 μm) (linha azul) e calculada teoricamente a partir da temperatura do CN (linha vermelha) x temperatura ajustada no CN. ....	81
Figura 4.17 - Radiância calculada a partir da temperatura medida pelo sensor x ND pela relação disponibilizada pelo fabricante a partir das temperaturas medidas pelo Sensor A. ....	81
Figura 4.18 - Relação entre a radiância teórica calculada a partir da temperatura do CN e NDs estimados pela relação disponibilizada pelo fabricante a partir das temperaturas medidas pelo Sensor A. ....	82
Figura 4.19 - Relação obtida entre a radiância calculada a partir da temperatura medida pelo Sensor e a temperatura medida pelo Sensor A. ....	83
Figura 4.20 - Relação obtida entre a radiância calculada a partir da temperatura medida pelo Sensor e a temperatura medida pelo Sensor B. ....	83
Figura 4.21 - Relação entre a radiância do Corpo Negro e a temperatura medida pelo Sensor A. ....	84

Figura 4.22 - Relação entre a radiância do corpo negro e a temperatura medida pelo Sensor B.....	84
Figura 4.23 – Comparação entre os valores de temperatura aparente medidos pelos sensores A e B. ....	86
Figura 4.24 – Comparação entre os valores de temperatura aparente obtidos pelos Sensores A e B após a correção pela equação de calibração radiométrica.....	88
Figura 4.25 – Gráficos de valores de radiância calculados pela equação de Planck e através da equação de calibração a partir das medidas dos Sensores A (azul) e B (vermelho) e suas respectivas diferenças.....	89
Figura 4.26 – Comparação entre os valores de radiância, calculados pela equação de calibração, a partir dos dados fornecidos pelos sensores A e B.....	90
Figura 4.27 – Transmitância atmosférica obtida pelo modelo de transferência radiativa e FRE do Sensor A. ....	92
Figura 4.28 – Comparação entre os valores de radiância obtidos pelos Sensores A e B após a correção atmosférica. ....	92
Figura 4.29 – Comparação entre os valores de temperatura obtidos pelos Sensores A e B após a correção atmosférica. ....	94
Figura 4.30 – Gráficos resultantes das análises estatísticas das medidas com diferentes níveis de correção. ....	96
Figura 4.31 – Pontos de checagem e apoio.....	97
Figura 4.32 – Número de imagens sobrepostas utilizadas para a geração dos ortomosaicos.....	97
Figura 4.33 – Ortomosaicos termais gerados sem (1) e com pontos de controle (2).....	99
Figura 4.34 – Modelos de superfície gerados sem (1) e com pontos de controle (2).....	100
Figura 4.35 - Erro planimétrico do ortomosaico sem pontos de apoio.....	102
Figura 4.36 - Vetores de erro planimétrico do ortomosaico sem pontos de apoio.....	103
Figura 4.37 - Vetores de erro vertical do ortomosaico sem pontos de apoio. ....	103
Figura 4.38 - Erro planimétrico – ortomosaico com quatro pontos de apoio. ....	106
Figura 4.39 - Vetores de erro planimétrico do ortomosaico com quatro pontos de apoio. ....	106
Figura 4.40 - Vetores de erro altimétrico do ortomosaico com quatro pontos de apoio. ....	107
Figura 4.41 – Desvios observados no ponto de verificação P07. ....	108

Figura 4.43 – Desvios observados no ponto de verificação P40. ....	109
Figura 4.44 – Desvios observados no ponto de verificação P65. ....	110



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Emissividade, temperatura termodinâmica e temperatura radiante de materiais a 300 K / 26,85 °C.....	12
Tabela 2.2 - Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria dos produtos cartográficos digitais.....	42
Tabela 2.3 - Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica para MDT, MDE e MDS para a produção de produtos cartográficos digitais.....	42
Tabela 3.1 - Especificações técnicas dos sensores a serem calibrados.....	45
Tabela 3.2 - Valores de pares de linhas/ metro.....	51
Tabela 3.3 – Parâmetros atmosféricos coletados em campo e utilizados no modelo. ....	57
Tabela 4.2 – Estatísticas dos pontos de checagem do ortomosaico gerado sem GCPs (em metros). ....	101
Tabela 4.3 – Pontos de controle utilizados na geração do ortomosaico (em metros). ....	104
Tabela 4.4 – Estatísticas dos pontos de checagem do ortomosaico gerado com quatro GCPs (em metros). ....	105
Tabela 4.5 – Resultado dos testes de normalidade para amostras de erros sem GCPs.....	111
Tabela 4.6 – valores de $\chi^2$ calculados com para os erros no sentido norte.....	112
Tabela 4.7 - Avaliação do ortomosaico sem pontos de controle a partir dos erros norte. ....	112
Tabela 4.8 – PEC planimétrico. ....	113
Tabela 4.9 – PEC Altimétrico.....	113
Tabela 4.10 – PEC norte e leste. ....	113
Tabela 4.11 - Avaliação do ortomosaico sem pontos de controle a partir dos erros no sentido leste. ....	113
Tabela 4.12 - Avaliação do ortomosaico sem pontos de controle a partir dos erros planimétricos. ....	114

Tabela 4.13 - Avaliação do ortomosaico sem pontos de controle a partir dos erros verticais.....	114
Tabela 4.14 - Resultado dos Testes de Normalidade para amostras de erros com GCP. ....	115
Tabela 4.15 - Avaliação do ortomosaico com quatro pontos de controle a partir dos erros planimétricos.....	116
Tabela 4.16 - Avaliação do ortomosaico com quatro pontos de controle a partir dos erros no sentido leste.....	116
Tabela 4.17 - Avaliação do ortomosaico com quatro pontos de controle a partir dos erros no sentido norte.....	116
Tabela 4.18 - Avaliação do ortomosaico com quatro pontos de controle a partir dos erros altimétricos.....	116
Tabela 4.19 – Classificação dos ortomosaicos de acordo com o PEC-PCD. ....	117

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAT	<i>Automatic Aerial Triangulation</i>
AIM	<i>Aerial Image Modulation</i>
ASPRS	Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
BBA	<i>Bundle Block Adjustment</i>
CEP	Controle Estatístico do Processo
CN	Corpo Negro
CONCAR	Comissão Nacional de Cartografia
CTF	<i>Contrast Transfer Function</i>
DRMS	<i>Distance Root Mean Square</i>
EIFOV	<i>Effective Instantaneous Field of View</i>
EP	Erro Padrão
ET-ADGV	Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais
FOV	<i>Field of View</i>
FPA	<i>Focal Plane Array</i>
FRE	Função de Resposta Espectral
GCP	<i>Ground Control Points</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
IMU	Unidade de Medição Inercial
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LaRaC	Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos
MDS	Modelo Digital de Superfície

MDT	Modelo Digital do Terreno
MNE	Modelo Numérico de Elevação
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
ND	Número digital
NETD	<i>Noise Equivalent Temperature Difference</i>
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>
RSR	Relação Sinal Ruído
TIR	Thermal Infrared
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UFPA	<i>Uncooled Focal Plane Array</i>
UNIVAP	Universidade do Vale do Paraíba
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Organização do trabalho.....	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 Radiação eletromagnética no infravermelho termal.....	7
2.1.1 Lei da Radiação de Planck.....	8
2.1.2 Lei de Stefan-Boltzman.....	9
2.1.3 Lei de Wien.....	10
2.1.4 Emissividade e Lei de Kirchoff.....	10
2.1.5 Influência Atmosférica.....	13
2.2 Sensoriamento Remoto Termal.....	18
2.2.1 Sistemas sensores.....	19
2.2.2 Detectores.....	20
2.2.3 Resposta Espectral.....	22
2.2.4 Capacidade Radiométrica.....	24
2.2.5 Resolução Espacial.....	25
2.2.5.1 <i>Contrast Transfer Function</i> - CTF.....	27
2.2.5.2 Teorema e Frequência de Nyquist.....	29
2.3 Princípios de Fotogrametria.....	30
2.4 Veículo Aéreo Não Tripulado - VANT.....	33
2.4.1 VANTs aplicados a missões de sensoriamento remoto termal.....	34
2.4.2 Fotogrametria com VANTs.....	37
2.5 Qualidade em produtos cartográficos.....	39
2.5.1 Padrão de Exatidão Cartográfica.....	41
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	43
3.1 Material.....	43
3.1.1 Sensores.....	44
3.1.2 Veículo aéreo não tripulado.....	45
3.1.3 Alvos de Referência.....	46
3.1.4 Ortomosaico e MDS de referência.....	46
3.2 Experimentos laboratoriais.....	47

3.2.1	Caracterização espectral .....	48
3.2.2	Caracterização espacial .....	49
3.2.3	Caracterização radiométrica .....	51
3.3	Experimentos de Campo .....	54
3.3.1	Área de Estudo .....	54
3.3.2	Medição de Alvos em Campo.....	55
3.3.3	Coleta de imagens com VANT .....	59
3.3.3.1	Geração dos ortomosaicos .....	62
3.3.3.2	Avaliação do ortomosaico e MDS quanto ao PEC .....	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	69
4.1	Caracterização Espectral .....	69
4.2	Caracterização Espacial.....	73
4.3	Caracterização radiométrica .....	78
4.4	Análise radiométrica de campo .....	84
4.5	Avaliação da exatidão posicional dos ortomosaicos e MDSs .....	96
4.5.1	Análise Descritiva.....	101
4.5.1.1	Ortomosaico e MDS sem GCP .....	101
4.5.1.2	Ortomosaico e MDS com GCP .....	104
4.5.2	Análise Estatística e classificação quanto ao PEC.....	110
4.5.2.1	Ortomosaico e MDS sem GCP .....	110
4.5.2.2	Ortomosaico e MDS com GCP .....	114
4.6	Síntese dos Resultados e Discussão .....	118
5	CONCLUSÕES .....	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	125

# 1 INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto Termal é um ramo do Sensoriamento Remoto que lida com a aquisição, processamento e interpretação dos dados adquiridos na faixa espectral do infravermelho termal (TIR, sigla em inglês *Thermal InfraRed*) do espectro eletromagnético. Na detecção remota óptica, é medido o valor da radiação refletida pelo alvo na superfície, em contrapartida, na detecção termal, mede-se a radiação emitida a partir da superfície do alvo em questão.

O uso de sensores que operam nesta faixa do espectro por muito tempo ficou restrito à área militar, aplicado a sobrevoos noturnos de reconhecimento, detecção de alvos inimigos, etc. O uso em aplicações civis é mais recente. Somente em 1968 o governo norte americano liberou o uso dos sensores termais para aplicações não militares (JENSEN, 2009). Desde então, a detecção termal passou a ser utilizada para exploração geológica, detecção de incêndios, operações de localização de pessoas, previsão meteorológica, entre outras.

Contudo, a larga utilização destes dados pela sociedade civil esbarra em alguns desafios. Há poucos sensores orbitais operacionais disponíveis que operam na faixa do TIR. Dentre os sistemas TIR existentes, precisa ser ainda considerada as suas limitações quanto à frequência de imageamento e resolução espacial.

As opções atuais são sistemas sensores orbitais de alta frequência temporal e baixa resolução espacial, como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e o AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*); ou sensores de média resolução espacial e baixa frequência temporal, como o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) e o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) (WARREN, 2013).

Alternativamente, sensores termais podem ser utilizados em aeronaves, o que resulta em um ganho em termos de resolução espacial e na flexibilidade temporal da coleta de dados. No entanto, Jensen (2009) afirma que o imageamento termal aéreo não tem sido largamente disponível ao público geral, porque tais missões envolvem custo

relativamente alto do sensor termal e de mobilização de uma aeronave para aquisição dos dados, além da dificuldade para calibrar e interpretar corretamente a imagem ou dado adquirido.

Atualmente, este cenário está sendo alterado. Um dos motivos é porque o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), de custo reduzido em comparação com outras plataformas para obtenção de dados, surgiu como um substituto viável e/ou complementar às atuais plataformas de sensoriamento remoto, como satélites e aviões tripulados (SALAMÍ et al., 2014). Em comparação com a detecção remota por via aérea tradicional, as vantagens do uso de VANT se consolidam, sobretudo, pelo seu baixo custo e pelo aumento de oportunidades de uso, resistência, flexibilidade temporal e resolução espacial (WATTS et al., 2012).

Aliado ao aumento da disponibilidade de veículos aéreos não tripulados de baixo custo, os sensores termais, sobretudo os sensores não refrigerados, vêm sendo desenvolvidos com o intuito de adaptação em plataformas não tripuladas e comercializados a preços mais acessíveis. Essas mudanças recentes têm estimulado o maior uso de sensores que operam nesta faixa espectral a bordo de veículos aéreos não tripulados, com diversas aplicações, a saber: áreas de floresta e vegetação em geral (SMIGAJ et al., 2015; SALAMÍ et al., 2014), agricultura (HOFFMANN et al. 2015), contaminação ambiental (LEGA et al., 2012), detecção de incêndios (KONTOES et al., 2009), monitoramento de linhas de transmissão (MATIKAINEN et al., 2016), monitoramento de qualidade da água (LEGA; NAPOLI, 2009), entre outros.

Dessa forma, nos últimos anos, o sensoriamento remoto termal em aplicações civis vem ganhando maior abrangência. Assim, o desafio atual é obter informações de qualidade e com maior precisão considerando os recursos disponíveis. Esta é uma preocupação importante, visto que há uma série de fatores que podem interferir no dado coletado na faixa do infravermelho termal, como: a emissividade da superfície ou objeto observado, os componentes da camada de ar entre o sensor e o alvo, outras fontes de radiação TIR emitida e refletida em direção ao sensor, além da sensibilidade espectral, da capacidade radiométrica e da resolução espacial do sistema sensor empregado.

Há também desafios na medição precisa da temperatura termodinâmica dos objetos a partir de um VANT, porque as imagens TIR a serem adquiridas podem sofrer alterações conforme os ângulos de rotação, velocidade e altitude de voo desta plataforma. (SHENG et al, 2010).

Assim, o conhecimento detalhado do sistema sensor, bem como da plataforma utilizada, é imprescindível para que o resultado do imageamento termal possa ser utilizado como um dado de entrada na estimativa de parâmetros dos alvos observados na superfície. É essencial que as técnicas utilizadas para processar e interpretar a grande quantidade de dados com alta resolução espacial coletados por sensor termal embarcado em VANT sejam eficientes e que estes sejam precisos.

## **1.1 Objetivos**

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar as capacidades radiométricas, espectrais e espaciais de dois sensores termais comerciais, sendo um deles desenvolvido para a integração em plataformas não tripuladas, bem como avaliar a exatidão posicional dos produtos resultantes do seu uso em um VANT, segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

Para alcançar este objetivo, alguns objetivos específicos foram definidos:

- determinar as capacidades e limites radiométricos, espectrais e espaciais de dois sistemas sensores que operam no infravermelho termal;
- executar o levantamento aéreo através de um VANT embarcado com um sistema sensor operante no infravermelho termal;
- avaliar a influência da atmosfera no levantamento de dados termais a partir de sensor embarcado;
- gerar ortomosaicos e modelos de superfície empregando dados termais coletados por VANT em duas configurações de processamento: utilizando apenas as coordenadas do centro de perspectiva da câmera coletadas por GPS embarcado, e outro, utilizando pontos de controle coletados em campo;

- testar uma metodologia de avaliação de exatidão posicional, consagrada para avaliação de produtos cartográficos na faixa do visível, para produtos oriundos de sensoriamento remoto termal;
- classificar os produtos em conformidade com as normas técnicas da cartografia.

Para tanto, foram realizados procedimentos laboratoriais de caracterização do sensor a ser embarcado, bem como de um sensor com características técnicas semelhantes (cujo uso é indicado para experimentos laboratoriais e de campo), a fim de conhecer e comparar os seus limites operacionais e assim estabelecer parâmetros de correção para os dados a serem obtidos em campo.

Também foram realizados procedimentos em campo, utilizando um VANT quadricóptero para transportar um dos sensores termais e realizar a coleta de imagens em uma área de aproximadamente 10.000 m<sup>2</sup>. Neste local, pontos foram sinalizados por alvos termo-identificáveis, para posteriormente avaliar a exatidão posicional do ortomosaico termal e modelo de superfície resultante do sobrevoo.

Outro experimento de campo foi realizado para medir a temperatura radiante de alvos na superfície com diferentes coberturas (vegetação rasteira, via de bloquete, calçada de concreto e solo exposto) com o sensor embarcado em um VANT a uma altitude de 20 m, e a partir de outro sensor, manipulado manualmente, a aproximadamente 1,5 m de distância dos alvos. A partir deste experimento, foi possível analisar o comportamento radiométrico dos sensores e a influência da altitude de medição e dos gases atmosféricos da camada de ar entre a superfície e o sensor nas medidas de temperatura radiante realizadas, e o efeito de tais contribuições em relação à incerteza das medições de campo.

Este trabalho também objetivou apresentar uma rotina de procedimentos necessários para a avaliação do sistema sensor e do produto por ele obtido, visando apontar recomendações para trabalhos futuros que envolvam o uso de sensores termais em VANT.

## **1.2 Organização do trabalho**

Este documento foi redigido da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que fundamenta teoricamente o estudo. Este capítulo foi dividido em cinco itens, a saber: Radiação Eletromagnética no Infravermelho Termal, Sensoriamento Remoto Termal, Princípios de Fotogrametria, Veículo Aéreo Não Tripulado – VANT, e Qualidade de Produtos Cartográficos. No Capítulo 3 são abordados os materiais e métodos utilizados, sendo que os métodos estão subdivididos em Procedimentos Laboratoriais e de Campo. No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos experimentos laboratoriais: caracterização espectral, caracterização espacial e caracterização radiométrica; e daqueles realizados em campo, a saber: análise radiométrica de campo e avaliação da exatidão posicional dos ortomosaicos e modelos de superfície, bem como as respectivas análises dos resultados apresentados. No capítulo final estão colocadas as considerações finais que concluem o trabalho e trazem sugestões para pesquisas futuras.

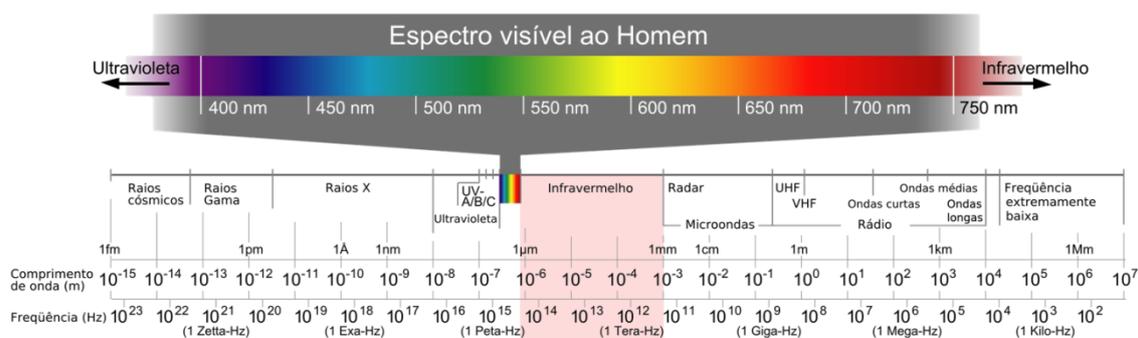


## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Radiação eletromagnética no infravermelho termal

A região do espectro eletromagnético referente ao infravermelho (*Infrared* - IR) é geralmente considerada como estando na faixa de 0,7 a 1000  $\mu\text{m}$ . Apesar de não haver um consenso, é possível dividir esta porção em infravermelho próximo (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ), infravermelho médio (1,3 a 3  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho termal (*Thermal Infrared* - IR) (3 a 1000  $\mu\text{m}$ ) (Figura 2.1).

Figura 2.1 – O Espectro Eletromagnético.



Fonte: SBFísica (2015).

Apesar da larga faixa espectral, as aquisições de dados da superfície terrestre na faixa do TIR são dependentes da dificuldade da construção de detectores para energias tão pequenas (aproximadamente 0,1 eV) e de regiões espectrais com menor absorção da radiação eletromagnética pela matéria, conhecidas como janelas atmosféricas, situadas em 3 a 5  $\mu\text{m}$  e 8 a 14  $\mu\text{m}$ . A interpretação dos dados entre 3 e 5  $\mu\text{m}$  são de difícil compreensão devido à sobreposição com a reflexão solar. Por isso a faixa entre 8 e 14  $\mu\text{m}$  tem sido alvo de maior interesse para o sensoriamento remoto termal da superfície terrestre.

A temperatura termodinâmica de um corpo é determinada pela energia cinética média dos átomos que o constituem (TIPLER; LLEWELLYN, 2001). Esta pode ser medida usando um termômetro e o colocando diretamente em contato físico com o objeto. Já a temperatura radiante é mensurada através da quantificação remota da radiação emitida

pelo objeto. Esta pode ser realizada, porque todo corpo com temperatura acima do zero absoluto (0 K ou -273,15 °C) emite radiação no infravermelho termal. A radiação eletromagnética que deixa um objeto é chamada de fluxo radiante ( $\varphi$ ), sendo medida em watts. A concentração de fluxo radiante, sendo emitida por um objeto é a sua temperatura radiante, que é função de sua temperatura termodinâmica e emissividade.

Segundo Jensen (2009), para a maioria dos objetos do mundo real (exceto para aqueles compostos de vidro e metal), geralmente há uma alta correlação positiva entre a temperatura termodinâmica do objeto e a quantidade de fluxo radiante sendo emitida por ele. Daí se sugere que é possível utilizar radiômetros colocados a alguma distância de um objeto para medir sua temperatura radiante, na expectativa que haja uma boa correlação com a verdadeira temperatura termodinâmica do objeto. Porém, devido ao fato de os objetos do mundo real não serem radiadores perfeitos, como um Corpo negro, esta não é uma correlação perfeita, podendo variar dependendo dos materiais analisados, isso devido à propriedade termal do objeto denominada emissividade.

### 2.1.1 Lei da Radiação de Planck

Um corpo que absorve toda a radiação incidente e irradia energia em função apenas da temperatura termodinâmica é chamado de Corpo Negro ideal (TIPLER; LLEWELLYN, 2001). A Lei da Radiação de Planck (Equação 2.1) descreve a radiação electromagnética emitida por um Corpo Negro ideal a um determinado comprimento de onda, como uma função da sua temperatura termodinâmica absoluta:

$$M_{\lambda} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 (e^{h c / \lambda k T} - 1)} \quad (2.1)$$

onde:  $M_{\lambda}$  = Radiância espectral emitida [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ];  $h$  = Constante de Planck [ $6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ];  $c$  = Velocidade da luz [ $2,9979246 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];  $k$  = Constante de Stefan-Boltzman [ $1,3806 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ];  $T$  = Temperatura termodinâmica absoluta [K]; e  $\lambda$  = Comprimento de onda [ $\mu\text{m}$ ].

### 2.1.2 Lei de Stefan-Boltzman

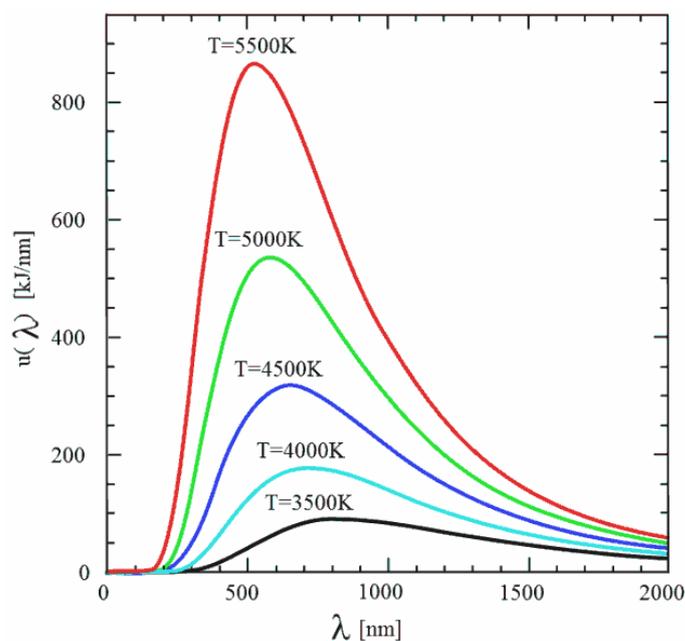
Segundo a Lei de Stefan-Boltzmann a exitância<sup>1</sup> radiante espectral total ( $M_b$ ), medida em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , deixando um corpo negro é proporcional à quarta potência da sua temperatura termodinâmica ( $T$ ), conforme Equação 2.2:

$$M_b = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

onde:  $\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann [ $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ].

Desse modo, à medida que a temperatura aumenta, a quantidade total de energia radiante, medida em W por  $\text{m}^2$ , aumenta, e o pico da energia radiante desloca-se em direção aos comprimentos de onda menores (Figura 3) (JENSEN, 2009).

Figura 2.2 - Exitância espectral.



Fonte: Adaptado de Setterfield et al. (2009).

Para determinar o comprimento de onda de máxima emitância de um corpo a uma dada temperatura termodinâmica, aplica-se a Lei do deslocamento de Wien.

---

<sup>1</sup> Excitância: Fluxo deixando uma superfície por unidade de área (NOVO, 2010).

### 2.1.3 Lei de Wien

A Lei do Deslocamento de Wien descreve a relação entre a temperatura termodinâmica de um Corpo Negro ( $T$ ), em kelvin, e seu pico de emitância espectral ou comprimento de onda de máxima emissão ( $\lambda_{máx}$ ) (Equação 2.3).

$$\lambda_{máx} \cdot T = 2,989 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2.3)$$

Conhecer o comprimento de onda de máxima emitância é importante, pois ele fornece informação sobre a parte do espectro eletromagnético em que o comportamento termal de um objeto pode ser observado. Considerando a Terra como um corpo negro e adotando a sua temperatura termodinâmica média de superfície como sendo de 300 K, encontra-se que o comprimento de onda dominante é 9,67  $\mu\text{m}$ , sendo, portanto, importante que os sensores utilizados para buscar informações a seu respeito operem em faixa que abranja tal comprimento de onda, geralmente entre 8 – 14  $\mu\text{m}$ .

### 2.1.4 Emissividade e Lei de Kirchoff

Quando a radiação incide em um corpo opaco, parte é refletida e parte é absorvida. Os corpos de cor clara refletem a maior parte da radiação visível incidente, enquanto os corpos escuros absorvem a maior parte da radiação. A radiação absorvida pelo corpo aumenta a energia cinética dos átomos que os constituem, fazendo-os oscilar mais vigorosamente em busca de equilíbrio. Essas oscilações aceleram os elétrons contidos nos átomos, e estes, de acordo com a teoria eletromagnética, emitem radiação (TIPLER; LLEWELLYN, 2001).

Como já mencionado, um corpo que absorve toda a radiação incidente e emite toda a energia incidida sobre ele em função apenas da temperatura termodinâmica é chamado de Corpo Negro ideal (TIPLER; LLEWELLYN, 2001). Este é considerado um radiador ideal, porque absorve e converte em calor toda energia que recebe, independentemente do comprimento de onda, e transforma energia térmica em energia radiante com a taxa máxima que permitem as leis da termodinâmica.

Em modelos teóricos adotam-se a Terra como um radiador perfeito (Corpo Negro). Contudo, os corpos do mundo real não possuem essa capacidade e, em geral, apresentam distribuição espectral da emissividade ( $\varepsilon$ ) variável entre 0 (refletor perfeito) e 1 (corpo negro) ao longo dos comprimentos de onda, ou seja,  $\varepsilon = f(\lambda)$ . A estes corpos, denomina-se “radiadores seletivos”.

Outro conceito que deve ser considerado é o Corpo Cinza. Este é um radiador não-seletivo, ou seja, emite energia em função apenas da sua temperatura termodinâmica, no entanto com emissividade menor que 1 ( $\varepsilon < 1$ ).

A emissividade pode conceitualmente ser explicada como a razão entre a radiância real emitida por um objeto do mundo real radiando seletivamente ( $M_r$ ), e um Corpo Negro na mesma temperatura termodinâmica ( $M_b$ ) (JACOB et al., 2004), conforme Equação 2.4:

$$\varepsilon = \frac{M_r}{M_b} \quad (2.4)$$

Comumente, entende-se a emissividade como a verdadeira capacidade de emissão de um material comparada com aquela de um Corpo Negro. Trata-se de uma propriedade espectral que varia com a composição do material, configuração geométrica da superfície e, em alguns casos, com a temperatura termodinâmica. A emissividade varia de 0 a 1 e é controlada por fatores como o conteúdo de água, composição química, estrutura e rugosidade (FUCKNER, 2007). Para a maioria dos materiais naturais, a emissividade varia de 0,7 a 0,95.

Para estudos de sensoriamento remoto termal o conhecimento sobre a emissividade dos objetos analisados é importante porque a radiância que é medida pelos sensores é, basicamente, função da energia radiante emitida pelo objeto, assim, dois objetos com mesma temperatura termodinâmica que tenham emissividades diferentes apresentarão diferentes valores de radiância (JENSEN, 2009) (Tabela 2.1). Caso esta radiância não seja corrigida pelos valores de emissividade, a estimativa da temperatura termodinâmica da superfície será incorreta (PERES; DACAMARA, 2004).

Tabela 2.1 - Emissividade, temperatura termodinâmica e temperatura radiante de materiais a 300 K / 26,85 °C.

Material	Emissividade	Temperatura Termodinâmica		Temperatura Radiante	
		K	°C	K	°C
Corpo Negro	1,00	300	26,85	300,00	26,85
Água destilada	0,99	300	26,85	299,25	26,10
Basalto rugoso	0,95	300	26,85	296,18	23,03
Vegetação	0,98	300	26,85	298,49	25,34
Solo siltoso seco	0,92	300	26,85	293,81	20,66

Fonte: Adaptado de Jensen (2009, p. 261).

A inserção da emissividade para medir a temperatura termodinâmica dos objetos da superfície a partir do sensoriamento termal é possível por meio da aplicação da Lei da Radiação de Kirchoff, que, utilizando o princípio da conservação da energia (Equação 2.5), permite explicar a interação do fluxo radiante incidente ( $\Phi_{i\lambda}$ ).

Assim, a quantidade de fluxo radiante refletido ( $\Phi_{\rho\lambda}$ ) e absorvido ( $\Phi_{\alpha\lambda}$ ) pela superfície e a quantidade de fluxo radiante transmitido ( $\Phi_{\tau\lambda}$ ) através da superfície podem ser medidas mantendo-se o controle sobre o que acontece com a energia incidente ( $\Phi_{i\lambda}$ ).

$$\Phi_{i\lambda} = \Phi_{\rho\lambda} + \Phi_{\alpha\lambda} + \Phi_{\tau\lambda} \quad (2.5)$$

Dividindo cada uma das variáveis pelo fluxo radiante incidente original, ( $\Phi_{i\lambda}$ ) tem-se:

$$\frac{\Phi_{i\lambda}}{\Phi_{i\lambda}} = \frac{\Phi_{\rho\lambda}}{\Phi_{i\lambda}} + \frac{\Phi_{\alpha\lambda}}{\Phi_{i\lambda}} + \frac{\Phi_{\tau\lambda}}{\Phi_{i\lambda}} \quad (2.6)$$

Assim, é possível reescrever a Equação 2.6 como:

$$\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (2.7)$$

onde:  $\rho_{\lambda}$  é a reflectância espectral hemisférica do terreno,  $\alpha_{\lambda}$  é a absorptância espectral hemisférica, e  $\tau_{\lambda}$  é a transmitância espectral hemisférica (SLATER, 1980).

Segundo a Lei de Kirchoff, na região infravermelho do espectro, pode-se considerar a emissividade espectral de um objeto equivalente à sua absorptância espectral. Também é consenso que a maioria dos materiais do mundo real é opaca à radiação infravermelha termal, ou seja, o fluxo que emerge do outro lado do elemento do terreno é muito

pequeno e, portanto, pode ser desconsiderado. Assim sendo, a Equação 2.7 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\rho_{\lambda} + \varepsilon_{\lambda} = 1 \quad (2.8)$$

Essa relação permite explicar porque os materiais que são bons absorvedores são bons emissores e os bons refletores são maus emissores (JENSEN, 2009). Portanto, materiais como a água, que absorve quase toda energia incidente sobre si, terá uma emissividade maior que materiais como solo arenoso, que tem uma maior capacidade de refletir a energia que intercepta a superfície.

Conhecendo a emissividade dos materiais do mundo real, é possível ajustar a lei de Stefan-Boltzmann, originalmente aplicável a Corpos Negros (Equação 2.2), para que o fluxo radiante espectral total dos diferentes radiadores seletivos contidos na superfície da Terra ( $M_r$ ) seja calculado:

$$M_r = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.9)$$

A emitância observada por um sistema sensor termal é função da temperatura e emissividade da superfície e também das propriedades ópticas da coluna atmosférica localizada no *pixel* (*picture element*), e na sua vizinhança (FUCKNER, 2007). Assim, além da propriedade emissiva do alvo, outro fator que pode exercer influência sobre a estimativa da temperatura termodinâmica de um alvo a partir da radiância medida por um sensor é sua interação com a atmosfera.

### **2.1.5 Influência Atmosférica**

A radiação atmosférica de ondas longas (estendendo-se de 3  $\mu\text{m}$  até 100  $\mu\text{m}$ ) é de fundamental importância para estudos ambientais e tem sido estudada tanto empiricamente como teoricamente para o entendimento de sua influência sobre dados de sensoriamento remoto (MAGHRABI, 2007). Isso porque os gases presentes entre a superfície observada e o sensor interagem com a radiação eletromagnética e podem influenciar os valores de radiância registrados pelo sistema sensor.

Em geral, os sistemas sensores são construídos para operarem nas janelas atmosféricas, ou seja, onde a influência dos gases é menor e, a radiação refletida ou emitida pela superfície possa sensibilizar o detector sem grande interferência. Mesmo nestes casos, apesar de menor, o efeito dos gases não pode ser desprezado (BOREL, 2008), sendo necessária a avaliação quanto à faixa de operação do sensor e aos constituintes que possam exercer influência sobre os dados coletados por ele, para posterior correção.

Simplificadamente, a atmosfera é formada por um conjunto de gases, partículas suspensas (aerossóis) e os chamados hidrometeoros, sendo os dois últimos em menor proporção. Estes constituintes podem ainda ser desmembrados em dois tipos. No primeiro, estão os chamados “gases permanentes”, que possuem concentração homogênea e constante na maior parte da atmosfera. Entre eles, estão o nitrogênio ( $N_2$ ), e o oxigênio ( $O_2$ ), que juntos representam mais de 98% do volume da atmosfera (MAGHRABI, 2007).

O segundo tipo de constituintes da atmosfera são aqueles que possuem concentração variável no tempo e no espaço. Estes contribuem pouco em termos de volume, quando comparados ao primeiro grupo, mas são extremamente importantes no balanço de radiação da atmosfera (MAGHRABI, 2007). Entre eles, estão o vapor d'água ( $H_2O$ ), o Ozônio ( $O_3$ ) e o gás carbônico ( $CO_2$ ), que possuem concentrações variáveis dependendo da localidade, do sistema atmosférico atuante ou da estação (MARKOSKI, 2015).

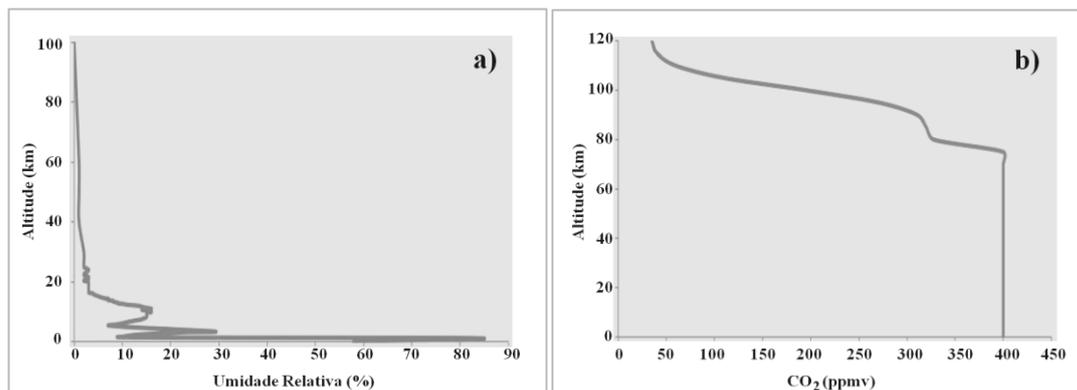
A maior parte dos gases e partículas presentes na atmosfera afeta o balanço radiativo do sistema climático, uma vez que são absorvedores e emissores ativos de radiação (VIÚDEZ-MORA, 2011). No entanto, a influência destes nos dados obtidos por sensoriamento remoto varia de acordo com a faixa do espectro eletromagnético na qual o sensor opera e a sua altitude em relação ao alvo observado.

A seguir, são detalhados os principais constituintes que exercem influência nos dados obtidos por sensores termais que operam na faixa de 7,5 a 13  $\mu m$  a bordo de veículos aéreos não tripulados que, em geral, coletam dados até 300 m de altitude.

O vapor d'água exerce grande influência nos dados coletados nas baixas camadas da atmosfera (Figura 2.3). É considerado o absorvedor mais importante e, portanto, o que

mais influencia na degradação das informações que chega ao sensor (MAROSKI, 2015; VIÚDEZ-MORA, 2011). As zonas de absorção do vapor d'água estão posicionadas de 5,5 até 8  $\mu\text{m}$  e próximo aos 12  $\mu\text{m}$ .

Figura 2.3 - Perfis dos gases atmosféricos: a) Vapor d'água e b) CO<sub>2</sub>.

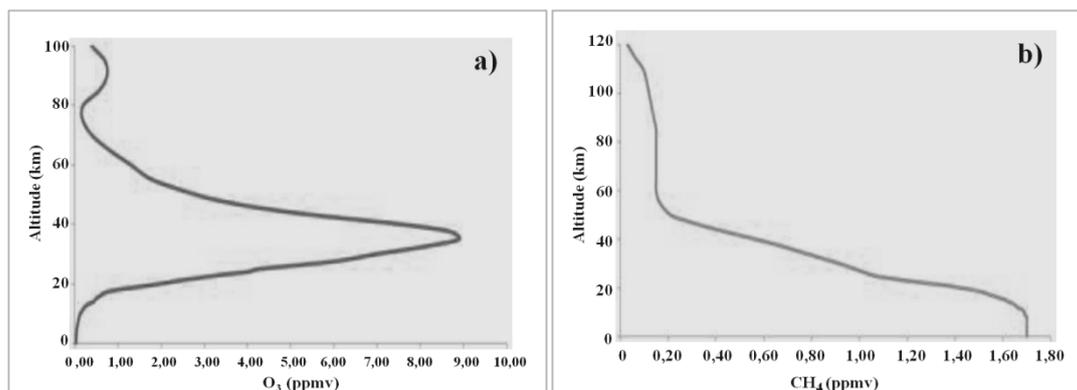


Fonte: Adaptado de Markoski (2015) e Abreu; Anderson (1996).

Outro gás que interage com a radiação infravermelha nas altitudes de obtenção de dados coletados por VANT é o CO<sub>2</sub> (Figura 2.3). Este tem concentração alta e constante até os 80 km, quando se observa a sua diminuição com o aumento da altitude. A concentração, que, em média, é de 400 ppmv, varia bastante dependendo da localidade, tendo aumento significativo em áreas com queima de combustíveis fósseis. Suas principais zonas de absorção estão centradas em 4,3  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ . Dentro da faixa de atuação do sensor analisado, observa-se uma zona de absorção deste gás em 12,5  $\mu\text{m}$ .

O ozônio (O<sub>3</sub>) também é um importante absorvedor nesta faixa do espectro eletromagnético e possui bandas de absorção posicionadas em 9,06 e 9,59  $\mu\text{m}$ . Apesar de este constituinte exercer grande influência sobre a radiação infravermelha, a concentração de ozônio é altamente variável no espaço (por exemplo, em latitude e altitude) e tempo. O ozônio tende a acumular-se na estratosfera inferior em altitudes entre 15 e 25 km, com uma concentração máxima entre 20 e 25 km, dependendo da latitude e da estação (MAGHRABI, 2007). Um exemplo deste comportamento pode ser observado na Figura 2.4. Assim, apesar de as zonas de absorção estarem posicionadas na faixa de operação do sensor analisado, sua influência sobre dados obtidos na altitude de voo de VANTs é mínima e pode ser desconsiderada.

Figura 2.4 - Perfil dos gases atmosféricos: a) Ozônio, O<sub>3</sub>; e b) Metano, CH<sub>4</sub>.



Fonte: Adaptado de Abreu; Anderson (1996).

O metano (CH<sub>4</sub>), ver Figura 2.4, tem sua maior concentração na troposfera e declina conforme o aumento da altitude. O impacto do CH<sub>4</sub> sobre a radiação eletromagnética é baixo, já que sua concentração total na atmosfera é inferior a 0,0002%. As zonas de absorção deste gás situam-se em 3,3 e 7,6 μm, sendo que esta última podendo exercer uma pequena influência sobre os dados do sensor analisado.

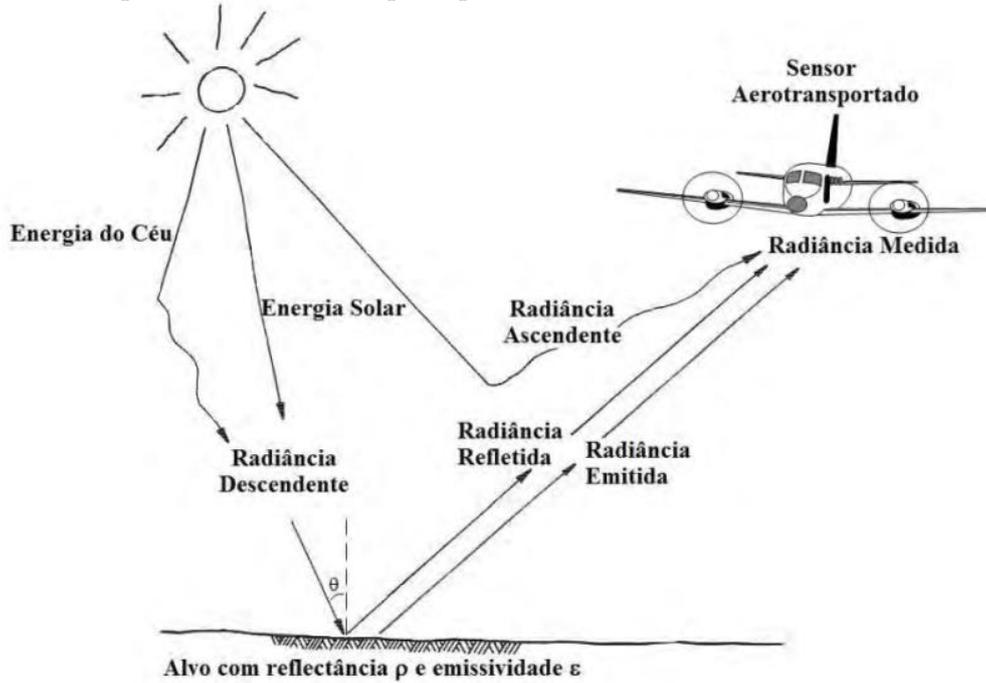
Ainda sobre a influência dos gases atmosféricos em baixas altitudes, muitos trabalhos se baseiam em Lorenz (1968) para desconsiderar tal efeito em dados obtidos abaixo de 500 pés, aproximadamente 150 m. Este autor afirma que, apesar de a atmosfera não ser totalmente transparente na região espectral entre 8 e 14 μm, “sua influência nas medições radiométricas da temperatura superficial é desprezível se a distância ao alvo for menor que 500 pés” (LORENZ, 1968, p. 1708).

### 2.1.5.1 Correção atmosférica

A radiação medida por um sistema sensor é composta por duas porções de fluxo direto, um proveniente do alvo e outro da atmosfera. O fluxo proveniente do alvo corresponde a: a) uma porção oriunda da reflexão pelo alvo da radiação descendente atmosférica,  $L_d$ ; e b) outra, referente a emissão de radiação do alvo a uma dada temperatura,  $\epsilon_\lambda B(\lambda, T_s)$ . Estas sofrem igualmente o efeito de espalhamento e absorção pela atmosfera, conhecido como transmitância atmosférica,  $\tau$ , devido à distância entre o sensor e o alvo observado. Além deste, outra componente do valor de radiação medido

pelo sensor é proveniente do fluxo difuso oriundo da atmosfera, que é conhecido como radiância atmosférica ascendente,  $L_a$ , e não tem relação com o alvo (Figura 2.5). Dessa forma, pode perceber a atuação atenuante e aditiva da atmosfera na radiação captada pelo sistema sensor devido à trajetória da radiação em direção à superfície da terra e ao caminho da radiação refletida e emitida para o sistema sensor (ANDRADE, 2011).

Figura 2.5 - Composição da radiação captada pelo sistema sensor e a influência da atmosfera.



Fonte: Andrade (2011) adaptado de Lillesand e Kiefer (1994).

Com base na equação de transferência radiativa (SOBRINO et al., 2004), a radiação medida por um sensor para um dado comprimento de onda ( $\lambda$ ) pode ser escrita com uma boa aproximação como:

$$L_{\lambda}^{at-sensor} = [\varepsilon_{\lambda}B(\lambda, T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda})Ld_{\lambda}^{atm\downarrow}] \tau_{\lambda} + La_{\lambda}^{atm\uparrow} \quad (2.10)$$

onde:  $L_{\lambda}^{at-sensor}$  é a radiância medida pelo sensor,  $\varepsilon_{\lambda}$  é a emissividade da superfície terrestre,  $B(\lambda, T_s)$  é a radiância do Corpo Negro dada pela lei de Planck e  $T_s$  é a temperatura termodinâmica da superfície,  $Ld_{\lambda}^{atm\downarrow}$  é a radiância atmosférica

descendente,  $\tau_\lambda$  é a transmitância atmosférica total entre a superfície e o sensor, e  $La_\lambda^{atm\uparrow}$  é a radiação atmosférica ascendente.

Assim, modelando a atmosfera do momento do sobrevoo, é possível estimar os parâmetros de transmitância, radiância ascendente e descendente e aplicar uma correção aos dados coletados pelo sensor.

## 2.2 Sensoriamento Remoto Termal

O sensoriamento remoto termal explora a condição de que todo corpo com temperatura termodinâmica acima do zero absoluto (0 K) emite radiação eletromagnética (REES, 2013; KUENZER; DECH, 2013). A temperatura termodinâmica de um corpo pode ser medida pelo contato físico direto usando um termômetro. No sensoriamento remoto termal, o objetivo é interpretar medidas de radiância emitidas por uma superfície na faixa espectral do infravermelho termal obtidas por um sensor à distância e relacioná-las com a temperatura termodinâmica da superfície (JENSEN, 2009).

Como já mencionado anteriormente, para a maioria dos objetos do mundo real há uma alta correlação positiva entre a temperatura termodinâmica de um objeto e a quantidade de fluxo radiante emitida por ele, o que permite a utilização de radiômetros colocados a alguma distância de um objeto para medir sua temperatura radiante e correlacioná-la à temperatura termodinâmica (JENSEN, 2009).

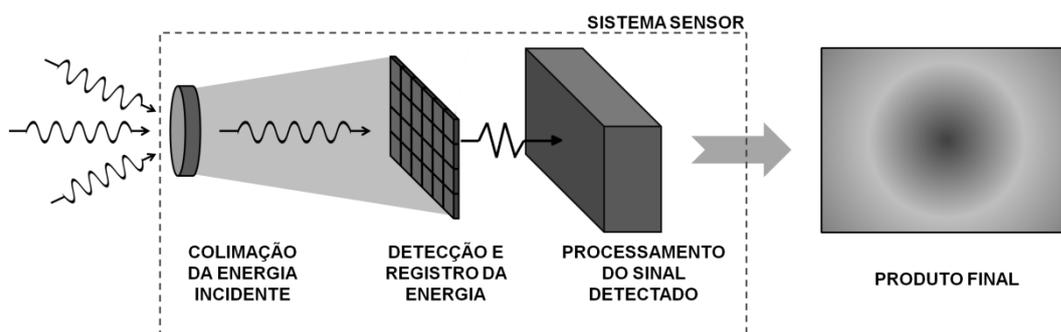
Para tanto, o conhecimento quanto às condições ambientais e geométricas de aquisição, às propriedades físicas da superfície observada e ao detalhado funcionamento das capacidades e incertezas do sistema sensor são essenciais para a qualidade da informação a ser adquirida (LIMA FILHO, 2015). Com tais conhecimentos, é possível “estabelecer uma relação, mais precisa e fiel possível, entre uma dimensão real e sua estimativa realizada a partir de um sensor ou instrumento qualquer” (PONZONI et al., 2007).

### 2.2.1 Sistemas sensores

Um sistema sensor é responsável pela conversão da energia proveniente dos objetos em um registro, na forma de imagem ou gráfico, que permita associar a distribuição da radiação, emitância ou retroespalhamento com suas propriedades físicas, químicas, biológicas ou geométricas.

De forma simplificada, pode-se dizer que um sistema sensor (Figura 2.6), independente da região do espectro em que opera, é composto por um subsistema de colimação da energia incidente sobre o sensor, um subsistema de detecção e registro dessa energia, através de uma matriz de detectores, e um subsistema de processamento do sinal detectado, cuja função é transformá-lo em dado passível de ser transmitido, gravado ou transformado em produto que possa ser analisado (NOVO, 2010).

Figura 2.6 - Componentes de um sistema sensor.



Fonte: a própria autora.

No processo de conversão e registro dessa energia, esta se encontra sujeita a um conjunto de transformações radiométricas, geométricas e espaciais (NOVO, 2010).

Os sensores termais possuem componentes semelhantes àqueles que operam no visível e no infravermelho próximo. A diferença fundamental é que o sinal a ser detectado tem intensidade relativamente menor nessa região do espectro, e assim, os detectores de radiação termal disponíveis são menos eficientes do que aqueles que operam nas outras faixas (NOVO, 2010), por ter no sinal detectado maior influência de ruídos.

No que se referem aos sistemas sensores termais, estes variam muito, dos mais simples aos mais robustos, quanto ao modo de operação, massa e dimensões bem distintas. Alguns deles fornecem valores de temperatura de brilho baseado em parâmetros, configurados na própria câmera (emissividade do alvo, temperatura ambiente, etc.) e outros mensurados pela câmera (temperatura interna, por exemplo). Pela diversidade de tipos e configurações de operação destes sistemas sensores, o conhecimento quanto ao seu funcionamento é tão importante.

Independentemente do tipo do sensor, ele é caracterizado por alguns elementos básicos, que indicam o que o usuário pode esperar dos dados por ele coletados. As características intrínsecas de um sistema sensor podem ser classificadas em: geométricas, espectrais, radiométricas e temporal, esta última no que se refere à frequência de aquisição de dados.

A caracterização de sensores termais, assim como dos sensores eletro-ópticos, consiste no dimensionamento das capacidades radiométricas, espectrais e espaciais do sistema sensor. Estes procedimentos permitem conhecer os limites reais de sua operação.

### **2.2.2 Detectores**

A detecção da radiação termal pode ser realizada tanto por sistema de varredura, onde a imagem é formada mediante um prisma rotativo que realiza a varredura de faixas transversais à direção de voo, quanto por uma matriz de detectores definida como FPA (do inglês, *Focal Plane Array*), sendo que a quantidade de detectores que compõe a FPA determina a resolução espacial da imagem, isto é, o seu número de *pixels*. Sensores que utilizam matriz de detectores são mais largamente utilizados atualmente.

Em geral, os detectores de infravermelho são agrupados em ‘detectores de fótons’ e ‘detectores termais’. Os detectores de fótons, caracterizados pela necessidade de refrigeração, podem ainda ser discriminados em: detectores intrínsecos, detectores extrínsecos, detectores fotoemissivos e detectores quânticos. Os detectores térmicos, por sua vez, operam em condições ambientais e se dividem em: bolômetros, piroelétricos e

termoelétricos, sendo os bolômetros mais amplamente utilizados atualmente (LAGÜELA et al., 2016).

Os fotodetectores utilizam semicondutores, tal como telureto de cádmio e mercúrio (HgCdTe). No processo de detecção, o fóton é absorvido dentro do material, onde ocorre uma interação com os elétrons. O sinal elétrico de saída observado é resultante da distribuição de energia eletrônica alterada por esta interação. Este tipo de detector tem alto desempenho da relação sinal-ruído e resposta rápida, mas, para isso, os detectores de fótons requerem refrigeração criogênica (ROGALSKI, 2010).

Devido à necessidade de refrigeração do sensor, as câmeras equipadas com fotodetectores, também conhecidas como câmeras refrigeradas, necessitam de um tempo maior para estabilização do equipamento ao ligá-la, a fim de alcançar o estado de temperatura correta dos detectores e um estado adequado para aquisição de dados (LAGÜELA et al., 2016).

Um tipo de detector bastante utilizado é o microbolômetro, que pertence ao grupo dos detectores térmicos. Ele detecta a chegada de fótons por meio de uma alteração da sua temperatura termodinâmica. O valor da resistência muda de acordo com a quantidade de radiação incidente, devido ao aquecimento que esta radiação gera na estrutura do resistor. A alteração de temperatura provoca uma alteração na condutividade do material do detector, que é monitorada por meio da intensidade da corrente de referência que circula no dispositivo. Esta mudança de resistência em cada pixel é então medida e processada, e, em seguida, usada para criar a imagem. A fim de poder detectar as variações de temperatura termodinâmica a partir da radiação infravermelha incidente, a sensibilidade destes detectores precisa ser muito alta (ROGALSKI, 2010).

Detectores do tipo microbolômetro operam em condições ambientais, embora às vezes sejam equipados com elementos de controle para a estabilização da temperatura dos detectores, objetivando reduzir o ruído térmico no sensor. Estes são feitos de silício amorfo (a-Si) e óxido de vanádio (VOx) (ROGALSKI, 2010). Pelo fato de não precisarem de refrigeração, os sensores que possuam este tipo de detector são

conhecidos como “sensores não refrigerados” ou UFPA (do inglês “*uncooled focal plane array*”).

Comparando os dois tipos de detectores, os refrigerados apresentam maior sensibilidade para diferenças de temperatura, e por isso maior contraste térmico e melhor qualidade da imagem resultante. Além disso, a sua velocidade de aquisição é maior. No entanto, os sensores com detectores UFPA são geralmente melhores para a detecção de radiação em infravermelho de comprimento de onda longa, e seu preço em termos de aquisição e de manutenção é menor (LAGÜELA et al., 2016).

A sensibilidade destes detectores, em geral, centra-se nos comprimentos de onda das duas principais janelas atmosféricas, 3 – 5  $\mu\text{m}$  e 8 – 14  $\mu\text{m}$ , variando de acordo com o tipo do detector e objetivo da aplicação do sensor (ROGALSKI, 2010).

### **2.2.3 Resposta Espectral**

A sensibilidade de um sensor em relação ao comprimento de onda da radiação incidente é obtida pela sua curva de resposta espectral. O procedimento de determinação desta curva é denominado ‘caracterização espectral’ (DINGUIRARD; SLATER, 1999). A caracterização é importante, pois permite conhecer a faixa específica do espectro eletromagnético na qual o sensor opera, e possibilita ao usuário conhecer os comprimentos de ondas com maior ou menor sensibilidade no sistema sensor.

A determinação desta curva ou Função de Resposta Espectral – FRE pode ser realizada utilizando uma fonte emissora e um sensor já calibrado, comparando-se a resposta do sensor de referência com a do sensor que se deseja caracterizar. Dessa forma, desde que as medições ocorram nas mesmas condições atmosféricas, geométricas e de iluminação, é possível derivar a curva resposta de espectral (LIMA FILHO, 2015).

Com isto, é possível estimar esta resposta a partir do arranjo experimental típico, que envolve: uma fonte de infravermelho; um monocromador<sup>2</sup>; um sensor de referência; e, também, a própria atmosfera e fatores geométricos.

Assim, o sinal medido por um sensor pode ser expresso por:

$$S_{sens}(\lambda) = M(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot FRE_{mono}(\lambda) \cdot \tau_{atm}(H, T_{amb}, P_{amb}, C_{gases}, d, \lambda) \cdot FRE_{sens}(\lambda) \cdot fator_{geo} \cdot FRE_{filtro}(\lambda) \quad (2.11)$$

onde:  $S_{sens}(\lambda)$  é o sinal medido pelo sensor a ser caracterizado;  $M(\lambda, T)$  é a exitância da fonte de infravermelho e  $\varepsilon(\lambda, T)$  é a emissividade da fonte de infravermelho, que depende do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e da temperatura termodinâmica ( $T$ ) da fonte de infravermelho;  $FRE_{mono}(\lambda)$  representa a função de resposta espectral do monocromador;  $\tau_{atm}$  é a transmitância atmosférica, que depende da umidade relativa do ar ( $H$ ), da temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), da pressão ( $P_{amb}$ ), da concentração de gases ( $C_{gases}$ ), da distância  $d$  percorrida pela radiação, no comprimento de onda de interesse;  $FRE_{sens}$  é a função de resposta espectral do sensor a ser caracterizado;  $fator_{geo}$  é um fator geométrico; e  $FRE_{filtro}(\lambda)$  é a função de resposta espectral de algum filtro que venha a ser utilizado.

Por sua vez, a resposta de um sensor de referência pode ser estimada por:

$$S_{ref}(\lambda) = M(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot FRE_{mono}(\lambda) \cdot \tau_{atm}(H, T_{amb}, P_{amb}, C_{gases}, d, \lambda) \cdot FRE_{ref}(\lambda) \cdot fator_{geo} \cdot FRE_{filtro}(\lambda) \quad (2.12)$$

onde:  $S_{ref}(\lambda)$  é o sinal medido pelo sensor de referência; e  $FRE_{ref}$  é a função de resposta espectral do sensor de referência.

Como se observa nas Equações (2.11) e (2.12), alguns termos podem ser iguais se considerarmos que as medições com o sensor a ser caracterizado e com o sensor de

---

<sup>2</sup> Monocromador: Dispositivo ou radiômetro de laboratório utilizado para observações ou medição da REM em um único comprimento de onda.

referência sejam realizadas: a) na mesma geometria; b) com os mesmos equipamentos (monocromador, fonte de infravermelho, filtros etc.); c) nos mesmos parâmetros atmosféricos (que não se alteraram significativamente); e d) que a temperatura termodinâmica da fonte de infravermelho seja a mesma.

Dessa forma, desde que as medições sejam realizadas nas mesmas condições, é possível obter a curva da resposta espectral do sensor a ser caracterizado (LIMA FILHO, 2015), pela razão entre as Equações (2.11) e (2.12):

$$FRE_{sens}(\lambda) = \frac{S_{sens}(\lambda)}{S_{ref}(\lambda)} \cdot FRE_{ref}(\lambda) \quad (2.13)$$

#### **2.2.4 Capacidade Radiométrica**

A capacidade radiométrica de um sistema sensor é dada pela sua capacidade de discretizar valores de radiação, medidos por cada detector e convertidos em sinal elétrico, em números digitais (ND).

Este processo de digitalização é feito em um sistema binário, utilizando codificação digital e apresentado em número de bits do sistema, em que cada bit de quantização, ao ser exponenciado na base 2, representa o número de possibilidade de números digitais. Assim, para um sistema de “n” bits, tem-se  $2^n$  NDs (LIMA FILHO, 2015).

Esta quantização do sinal está diretamente associada à qualidade da informação apresentada, sendo que em sistemas de baixa digitalização pode ocorrer degradação da informação, mesmo se obtida com um sensor de alta resolução espacial (MOREIRA, 2012).

Em geral, a relação entre o ND e o fluxo radiante incidente no sensor tem comportamento linear. Quando se objetiva conhecer mais detalhadamente esta relação, realiza-se a caracterização radiométrica (LIMA FILHO, 2015).

Para isso, se estabelece um arranjo experimental que tipicamente utiliza uma fonte de radiação infravermelha termal, chamada de Corpo Negro de Área Extensa - CN. Um

Corpo Negro possui uma superfície na qual a sua emissividade é conhecida e sua temperatura termodinâmica pode ser ajustada.

O valor da radiância proveniente do CN que chega ao sensor pode ser obtido através da integração da equação de Planck, levando-se em consideração a FRE do sensor:

$$L_{sens} = \int_{\lambda_{inicial}}^{\lambda_{final}} \frac{M(\lambda, T_{CN})}{\pi} \cdot \varepsilon_{CN}(\lambda, T_{CN}) \cdot FRE_{sens}(\lambda) \cdot \tau_{atm}(H, T_{amb}, P_{amb}, C_{gases}, d, \lambda) \cdot d\lambda \quad (2.14)$$

onde:  $L_{sens}$  é a radiância proveniente do Corpo Negro que chega ao sensor;  $M(\lambda, T_{CN})$  é a radiância da fonte de infravermelho;  $T_{CN}$  é a temperatura termodinâmica do Corpo Negro;  $\varepsilon(\lambda, T)$  é a emissividade da fonte de infravermelho, que depende do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e da temperatura termodinâmica ( $T$ ) da fonte de infravermelho;  $FRE_{sens}(\lambda)$  representa a função de resposta espectral do sensor;  $\tau_{atm}$  é a transmitância atmosférica, que depende da umidade relativa do ar ( $H$ ), da temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), da pressão ( $P_{amb}$ ), da concentração de gases ( $C_{gases}$ ), da distância  $d$  percorrida pela radiação, no comprimento de onda de interesse.

Dessa forma, em uma geometria fixa e com a utilização de fontes com comportamento uniforme (temporal e espacial), espera-se estabelecer uma relação linear em que cada número digital da imagem do sensor (sinal de saída), atribuído pelos detectores de um sistema sensor eletro-óptico, possa ser associado a um valor de radiância de uma fonte conhecida (fluxo incidente), através de um fator multiplicativo e de um termo aditivo (LIMA FILHO, 2015).

### 2.2.5 Resolução Espacial

A resolução espacial consiste basicamente na sua capacidade de detectar e manter a integridade geométrica de um objeto na superfície terrestre. A resolução espacial nominal de um sensor é a dimensão em metros, da menor separação linear entre dois objetos, determinada pelo sistema de sensoriamento remoto, sendo comumente atribuída

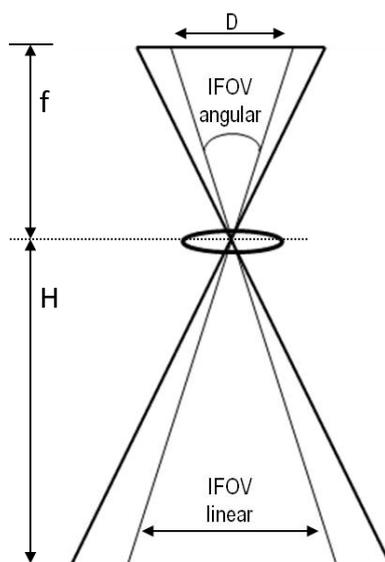
ao campo de visada instantâneo (*Instantaneous Field of View* - IFOV) (CRÓSTA, 1999; NOVO, 2010).

O IFOV (Figura 2.7) é definido como a área da projeção geométrica na superfície terrestre de um único detector a uma dada altitude, em um dado instante. (BOGGIONE, et al., 2009). A dimensão linear do IFOV é obtida pela Equação 2.15:

$$IFOV = \frac{H D}{f} \quad (2.15)$$

onde:  $H$  é a altura da plataforma (em metros),  $D$  é o diâmetro do elemento de amostragem no terreno (em metros), e  $f$  é a distância focal (em metros).

Figura 2.7 - Conceito de IFOV angular e linear.



Fonte: Adaptado de NOVO (2010).

De forma simplificada, o IFOV representa o tamanho do *pixel*, que por sua vez, é o menor elemento da matriz (linhas e colunas) formando a imagem. No entanto, alterando-se a atitude de um sensor, a área representada pelo IFOV será alterada, o que não se reflete no tamanho do pixel, que é fixo e determinado pelo intervalo de amostragem do sinal recebido pelo sensor (CRÓSTA, 1999). Através do processamento de imagens, o pixel pode ser reamostrado e ter seu tamanho alterado, porém o IFOV não irá se alterar, logo a resolução espacial nominal permanecerá a mesma (NOVO, 2010).

Na faixa espectral na qual são adquiridos dados termais, há uma baixa relação sinal/ruído (RSR). Assim, em sensores termais orbitais, a opção por um IFOV grande é uma forma de reduzir o ruído, uma vez que, quanto maior o campo de visada instantâneo do sensor, maior o tempo de permanência do detector sobre determinada área da superfície. Isso possibilita uma medida mais precisa da radiação emitida, uma vez que a intensidade do sinal de energia radiante medido tende a ser mais forte em relação ao ruído gerado por componentes do sistema sensor (MENESES; ALMEIDA, 2012). Com um IFOV de maior dimensão, o dado é coletado com melhor relação sinal/ruído (RSR), no entanto, com menor resolução espacial.

A resolução espacial, no entanto, não depende apenas do IFOV, já que o espaçamento entre os detectores, movimento, eletrônica, taxa de amostragem e efeitos ópticos também influenciarão na capacidade de resolução do sensor. Assim, utiliza-se o conceito de campo efetivo de visada instantânea (*Effective Instantaneous Field of View - EIFOV*) para representar a real resolução do sensor. Esta medida em ângulo representa quanto o sistema sensor resolve efetivamente os detalhes de uma cena, levando-se em consideração os ruídos desse sistema (LIMA FILHO, 2015).

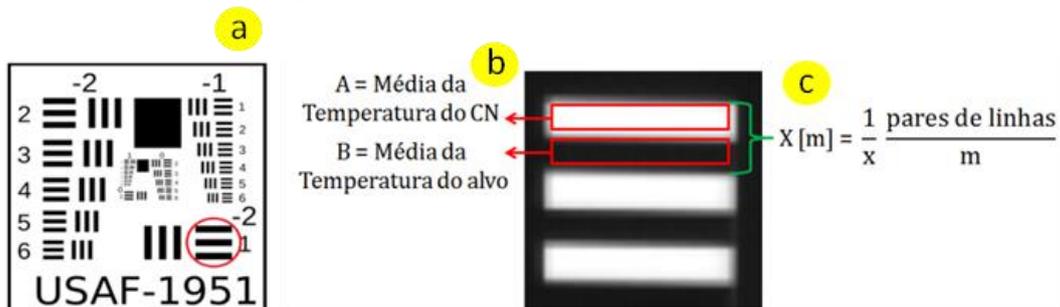
#### **2.2.5.1 Contrast Transfer Function - CTF**

Para a determinação do EIFOV de um sensor é utilizada comumente a função de transferência de contraste (*Contrast Transfer Function - CTF*), descrita por Schott (2007). Ela permite estabelecer uma relação entre o tamanho real dos objetos e o seu contraste na imagem obtida pelo sensor.

Neste caso, o contraste é obtido pela diferença entre os valores máximo e mínimo do sinal na imagem. Assim, para a obtenção desses valores, utiliza-se o alvo USAF 1951 (APPLIED IMAGE, 2005) (Figura 2.8-a), acoplado ao Corpo Negro. Ele possui grupos de linhas triplas, sendo cada grupo composto por dois elementos, e cada elemento, denominado Tribar, é composto por três linhas paralelas verticais e outro composto por três linhas paralelas horizontais igualmente espaçadas (LIMA FILHO, 2015). Este alvo

permite a análise de valores de radiância emitida pelo Corpo Negro (nas linhas vazadas) e pelo alvo (linhas fechadas, ou seja, o próprio material do alvo).

Figura 2.8 - a) Alvo padrão USAF 1951 Detalhado por um circulado em vermelho, um tribar; b) representação da obtenção das médias para cálculo de contraste; c) cálculo de pares de linhas por metro.



Fonte: Adaptado de LIMA FILHO (2015).

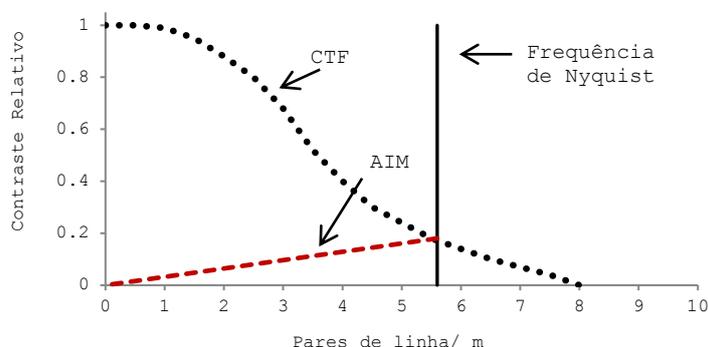
Com isto, a CTF pode ser obtida por meio de um gráfico (ver Figura 2.9), no qual o eixo das ordenadas (contraste relativo) é obtido pela Equação 2.16 normalizada pelo maior valor.

$$y = \frac{(A - B)}{(A + B)} \quad (2.16)$$

onde:  $A$  representa a média dos números digitais da radiação emitida (através da área vazada do alvo) pelo Corpo Negro e  $B$  a média dos números digitais na área da barra emitida pelo Alvo USAF-1951 (Figura 2.8-b).

O eixo das abscissas (pares de linhas) é obtido pelo inverso da dimensão de um par em metros, conforme ilustrado na Figura 2.8-c.

Figura 2.9 - Curva teórica da CTF, Modulação de imagem aérea (AIM) e Frequência de Nyquist.



Fonte: Adaptado de SCHOTT (2007).

### 2.2.5.2 Teorema e Frequência de Nyquist

Segundo o Teorema de Nyquist, para que um sinal seja capturado sem distorção, a taxa de amostragem desse sinal tem que ser, no mínimo, duas vezes maior que a componente de maior frequência do sinal de interesse (LIMA FILHO, 2015).

Baseada neste teorema, a frequência de Nyquist é utilizada para determinar o menor elemento a ser resolvido pelo sensor. Ela é determinada pela maior frequência de linhas que pode ser observada por um sistema eletro-óptico (SCHOTT, 2007). Ou seja, estabelece o limite da resolução espacial de um sistema eletro-óptico, no qual a taxa de amostragem (o *pixel*) precisa ter no mínimo duas vezes a frequência do alvo a ser imageado, conforme Equação 2.17:

$$f_n = \frac{1}{2 \cdot T_p} \quad (2.17)$$

onde:  $f_n$  é a frequência de Nyquist, e  $T_p$  é o tamanho efetivo da representação de um pixel na imagem, que pode ser calculado utilizando-se o número total de pixels que compreende a imagem do alvo e o tamanho real do alvo.

Ao traçar uma reta da intersecção da frequência de Nyquist pela CTF à origem, identifica-se a menor modulação detectável por um sistema sensor através da capacidade relativa ao contraste. Este limiar, denominado de modulação de imagem

aérea (*Aerial Image Modulation - AIM*), representa a modulação mínima necessária para produzir uma resposta no sistema (ALMEIDA 2007), desconsiderando qualquer ponto abaixo da reta AIM (LIMA FILHO, 2015).

A partir destes três conceitos (CTF, frequência de Nyquist e AIM), é possível derivar o efetivo campo de visada de um sensor e assim, conhecer sua resolução espacial.

### **2.3 Princípios de Fotogrametria**

Fotogrametria é definida pela Sociedade Americana de Fotogrametria como “a arte, ciência e tecnologia de obter informações confiáveis sobre objetos físicos e do ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes” (WOLF, 1985).

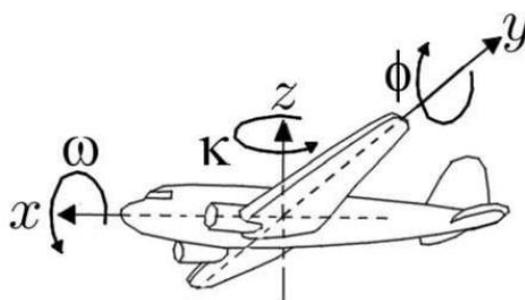
Para que um conjunto de imagens aéreas possa ser considerado um produto fotogramétrico, uma série de cuidados e processamentos precisa ser realizada a fim de garantir sua qualidade métrica. Para a realização destes procedimentos, parâmetros de orientação interior e exterior, oriundos do sensor utilizado e da tomada das imagens, precisam ser considerados e corrigidos.

Conceitualmente, a orientação interior consiste em colocar as imagens, uma a uma, em posição semelhante à que tinham dentro da câmera, no momento em que foram obtidas. Para isso, os parâmetros de orientação interior são obtidos através da reconstrução do feixe perspectivo, ou seja, através do referenciamento da imagem em relação à câmera (BRITO; COELHO, 2007).

São considerados parâmetros de orientação interior aqueles inerentes ao sistema ótico e do sensor da câmera, a saber: a distância focal do conjunto de lentes, os parâmetros de distorção radial, os parâmetros de distorção descentrada e a posição da coordenada central no sistema de coordenadas da câmera. Estes parâmetros permitem a correção de distorções nas imagens e são obtidos durante o processo de calibração da câmera (FERREIRA, 2014).

A orientação exterior, por sua vez, tem por objetivo a obtenção da posição e da atitude do sensor ao coletar cada imagem em relação ao referencial do espaço-objeto. São seis os parâmetros necessários para realização da orientação exterior: as coordenadas no espaço-objeto para o centro de perspectiva ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) e os ângulos de rotação ou de atitude do sensor ( $\omega$ ,  $\varphi$  e  $k$ ) (Figura 2.10). Estes últimos são denominados “ângulos de Euler” e se referem às rotações sofridas pelo sistema local de coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  (de cada câmera) em relação ao referencial do terreno ( $X$ ,  $Y$  e  $Z$ ) (BRITO; COELHO, 2007).

Figura 2.10 - Parâmetros de orientação exterior referentes à atitude de um sensor fotogramétrico colocado em plataforma aérea.



Fonte: BRITO; COELHO (2007).

A obtenção dos ângulos de Euler pode ser efetuada pelo uso de um sistema de medição inercial (IMU) embarcado na plataforma ou, dentre outras possibilidades, através de ajustamentos por equações de colinearidade aplicadas às imagens, método denominado “ressecção espacial”. Para aplicar este método, são necessários, pelo menos, três pontos de apoio de campo para cada imagem (BRITO; COELHO, 2007).

Atualmente, há uma solução matemática que permite que os parâmetros da orientação exterior de cada imagem, bem como as coordenadas dos pontos fotogramétricos no sistema de terreno e os parâmetros do sensor fotogramétrico (distância focal e coeficientes de distorção das lentes) possam ser computados e ajustados simultaneamente segundo o método dos mínimos quadrados. Este grande modelo matemático é chamado de “fototriangulação por feixes perspectivos” (*bundle adjustment*) e tem sido utilizado pela maior parte dos restituidores analíticos e soluções digitais atuais (BRITO; COELHO, 2007).

Lugnani (1987) define fototriangulação como sendo um método fotogramétrico, no qual se determinam as coordenadas dos pontos no espaço objeto por meio da relação geométrica de fotos adjacentes devidamente tomadas; de controle de campo, dado para definir o sistema do espaço objeto; e de um conjunto de valores aproximados de parâmetros.

Os parâmetros obtidos na fototriangulação são essenciais nas práticas posteriores de retificação, restituição e ortorretificação. A retificação consiste na eliminação das distorções causadas pelos ângulos de atitude da câmera (BRITO; COELHO, 2007). A restituição consiste em um processo de “reconstrução” do terreno fotografado a partir da interseção dos raios (equações de colinearidade) definidos pelos pontos homólogos nos estereopares. Assim, como resultado da restituição, tem-se um modelo óptico tridimensional, denominado modelo estereoscópico do terreno fotografado (ANDRADE, 1998).

A ortorretificação, por sua vez, é o processo de transformação de uma imagem em perspectiva central em outra em perspectiva ortogonal. O nome “ortoimagem” refere-se à definição simples de “imagem em perspectiva ortogonal”.

As imagens adquiridas por câmeras e sensores são tomadas em perspectiva central, com os inúmeros raios de luz advindos de diferentes pontos imageados, passando por um só ponto (centro de perspectiva), localizado no sistema óptico da câmera. Essa perspectiva confere à imagem resultante erros devido à rotação do sensor e deslocamentos do relevo, em que pontos com a mesma posição planimétrica, mas com diferentes altitudes, são representados em posições diferentes (PALERMO; LEITE, 2013). Esses erros são inerentes à perspectiva cônica e por isso, uma imagem em perspectiva central não pode ser tomada como fonte de informação métrica segura (LIMA et al. 2010).

Em uma imagem em perspectiva ortogonal os raios ortogonais são projetados a partir da região imageada e nunca se encontram. Na transformação da perspectiva cônica em ortogonal todas as feições verticais são reprojetaadas, de forma a se eliminar por completo qualquer resquício de inclinação dos alvos que se elevam acima da superfície terrestre e, por isso, a imagem final em um sistema como esse não possui desvios nem

distorções relativos ao relevo. Portanto, ao contrário da projeção central, esta pode ser tomada como um documento cartográfico e empregada em qualquer atividade que demande um mapa, carta ou fonte de dados similar (BRITO; COELHO, 2007).

A perspectiva ortogonal é um fenômeno artificial. Assim, para obter ortoimagens, faz-se necessário realizar uma transformação sobre as imagens já existentes (em perspectiva central), a chamada ortorretificação (BRITO; COELHO, 2007). Os principais modelos matemáticos aplicados para tal transformação são: transformação afim, projetiva e retificação diferencial.

Por fim, após o processo de ortorretificação, quando a área de interesse é coberta por um conjunto de imagens, gera-se um mosaico das imagens ortorretificadas. Neste produto final, o ortomosaico, cabe realizar uma avaliação, a fim de se verificar sua qualidade em termos de exatidão posicional com relação à escala que se pretenda utilizar o produto e, a partir daí, obter informações espaciais precisas.

#### **2.4 Veículo Aéreo Não Tripulado - VANT**

O termo Veículo Aéreo Não Tripulado, ou simplesmente VANT, refere-se a todo e qualquer tipo de aeronave que não necessita de um operador humano embarcado, que se utiliza de forças aerodinâmicas para se elevar, podendo voar autonomamente ou ser pilotado remotamente, transportando ou não carga útil (DOD, 2003). É também conhecido como UAV (do inglês *Unmanned Aerial Vehicle*), RPA (do inglês *Remotely Piloted Aircraft*) ou ainda, *Drone* (Zangão em inglês), quando se refere a aeromodelos com finalidade de esporte e diversão, termo popularmente usado no Brasil.

De acordo com Barnhart et al. (2011), os primeiros usos de VANTs, datam de 180 – 234 d.C. na China. Houve desde então um constante crescimento do uso de VANTs, sobretudo em aplicações militares, devido às inúmeras vantagens do seu uso, como, por exemplo, a não exposição do tripulante ao risco de acidentes. Com o tempo, aeronaves não tripuladas passaram a ser empregadas na área civil, sendo bastante utilizadas

atualmente para aplicações na área de sensoriamento remoto e fotogrametria (BISPO, 2013).

As seguintes vantagens atribuídas ao uso de VANTs para o sensoriamento remoto em relação a aeronaves tripuladas e sistemas orbitais foram apontadas por Longhitano (2010), a saber:

(...) redução dos custos de obtenção de imagens/ fotografias aéreas; maior flexibilidade de resolução temporal para aquisição das imagens de alta resolução espacial; possibilidade de execução de missões em condições adversas sem risco para o piloto e operador da câmera aerofotogramétrica; menor necessidade de gastos de treinamento de pilotos e; a maior facilidade e velocidade de incorporação de novas tecnologias (LONGHITANO, 2010, p.2).

Atualmente, caracteriza-se um VANT como um sistema composto de diversos subsistemas, que incluem a aeronave propriamente dita, suas cargas, a estação de controle e outras estações remotas, o subsistema de lançamento e recuperação (quando aplicável), o subsistema de suporte, comunicação e transporte, dentre outros (BISPO, 2013).

#### **2.4.1 VANTs aplicados a missões de sensoriamento remoto termal**

Na faixa espectral na qual são adquiridos dados termais, há uma baixa relação sinal/ruído (RSR). Assim, em sensores termais orbitais, a opção por um sensor com campo de visada instantâneo (IFOV) grande é uma forma de reduzir o ruído, o que, no entanto, contribui para que a resolução espacial destes sensores seja insuficiente para determinadas aplicações.

Alternativamente, o uso destes sensores em aeronaves resulta em um ganho em termos de resolução espacial e na flexibilidade temporal da coleta de dados. No entanto, Jensen (2009) afirma que o imageamento termal aéreo não tem sido largamente disponível ao público geral porque tais missões envolvem custo relativamente alto do sensor termal e de mobilização de uma aeronave para aquisição dos dados; além da dificuldade para calibrar e interpretar corretamente a imagem ou dado adquirido.

Atualmente, este cenário está sendo alterado. Um dos motivos é porque o uso de VANT, de custo reduzido em comparação com outras plataformas para obtenção de dados, surgiram como um substituto viável e/ou complementar às atuais plataformas de sensoriamento remoto, como satélites e aviões tripulados (SALAMÍ et al., 2014). Em comparação com a detecção remota por via aérea tradicional, as vantagens do uso de VANT se consolidam, sobretudo pelo seu baixo custo e pelo aumento de oportunidades de uso, resistência, flexibilidade temporal e resolução espacial (WATTS et al., 2012). Aliado ao aumento da disponibilidade de veículos aéreos não tripulados de baixo custo, sensores termais, sobretudo sensores não refrigerados, vêm sendo desenvolvidos com o intuito de adaptação em plataformas não tripuladas e comercializados a preços mais acessíveis.

Além de maior resolução espacial, Vasterling e Meyer (2013) apontam outras vantagens do emprego de um VANT para estudos termais, a saber: pode ser usado em áreas que não são acessíveis no nível do solo; é a única plataforma adequada para áreas íngremes e; permite a aquisição de dados termais em alta resolução temporal, que não podem ser obtidos a partir de outras plataformas transportadoras, como aeronaves ou satélites.

Assim, essas mudanças recentes têm estimulado o maior uso de sensores que operam nesta faixa espectral a bordo de veículos aéreos não tripulados, com diversas aplicações. Algumas pesquisas recentes que aplicaram dados obtidos por sensores termais embarcados em VANT são apresentadas a seguir.

Smigaj et al. (2015) utilizaram um sistema sensor termal de baixo custo embarcado em VANT de asa fixa para monitorar a elevação da temperatura do dossel induzida por doenças. Baseados nas análises comparativas e nos resultados obtidos, os autores concluíram que os sensores termais neste tipo de plataforma podem ser capazes de detectar diferenças de temperatura inferiores a 1 °C induzidas pelo início de determinada doença. Vale ressaltar que os dados utilizados pelos autores foram corrigidos por equações obtidas através da calibração do sensor utilizado.

Berni et al. (2009) demonstraram a capacidade de geração de produtos de sensoriamento remoto quantitativos para estudos de áreas agrícolas a partir de VANT equipado com

sensores termais e multiespectrais de baixo custo. Como resultado, os produtos obtidos foram índice de área foliar, teor de clorofila e detecção de estresse hídrico a partir dos índices e de dados da temperatura da copa. Os autores afirmam que os resultados obtidos com o sistema VANT de baixo custo para aplicações agrícolas produziram estimativas comparáveis, se não melhores, do que as obtidas pelos sensores aéreos tripulados tradicionais. Importa ressaltar que o sensor utilizado foi calibrado em laboratório e os dados termais coletados passaram por correções atmosféricas pelo modelo de transferência radiativa MODTRAN.

A evapotranspiração pode ser estimada usando modelos de fluxo de calor de superfície terrestre e temperaturas de superfície remotamente detectadas. Recentemente, o uso de VANT tem se tornado uma alternativa para a obtenção destes dados em alta resolução espacial e com possibilidade de maior frequência temporal.

Nesse sentido, Hoffmann et al. (2015) utilizaram um VANT de asa fixa com um sensor termal embarcado sobre um campo de cevada na Dinamarca ocidental, a fim de avaliar se, através deste sistema, seria possível fornecer dados de qualidade suficiente para modelagem de fluxos de calor emitidos pela superfície. Segundo os autores, as imagens obtidas foram processadas com êxito em mosaicos térmicos, que serviram de entrada no modelo, e deste, os resultados obtidos foram comparáveis aos estudos estimando a evapotranspiração com dados de temperatura da superfície recuperados por satélite e modelos físicos de superfície terrestre. Contudo, como recomendação, os autores ressaltam que uma calibração do sensor com temperaturas *in situ*, juntamente com a conversão da temperatura de radiante para temperatura termodinâmica, através da emissividade da superfície conhecida e dados atmosféricos de ondas longas, provavelmente teria melhorado os resultados.

Os trabalhos desenvolvidos por Lega e Napoli (2009) e Lega et al. (2012) na costa Italiana, utilizando sensores que operam na faixa do infravermelho termal embarcados em diversas plataformas, entre elas VANTs, demonstraram que a termografia infravermelha é uma ferramenta ideal para detectar a contaminação ambiental e que o banco de dados de alta resolução, obtido por plataformas não tripuladas, define com

precisão o estado atual da região, que fornece um ponto de referência para futuras investigações.

Segundo os referidos autores, as conexões ilegais de esgoto sanitário e drenagem de águas pluviais, descargas ilícitas e outras "anomalias" nas águas superficiais podem ser facilmente identificadas por suas assinaturas no infravermelho termal. Isso porque, quando as fontes de poluição infiltram-se em riachos, córregos, rios, lagos e mares, a pluma de líquido que se une e flui a jusante com o corpo de água é visível no espectro infravermelho térmico devido à diferença de temperaturas dos dois líquidos, e assim, podem ser realçadas com precisão (LEGA; NAPOLI, 2009).

Apesar de ainda pouco explorado no Brasil, o uso de sensores termais embarcados em aeronaves e em VANTs a fim de se obter dados termais com maior resolução espacial e temporal tem sido crescente na última década e, como demonstrado, em uma variedade de aplicações operacionais.

Contudo, sabe-se que há uma série de fatores que podem interferir no dado coletado na faixa do infravermelho termal, como a emissividade da superfície ou objeto observado, os componentes da camada de ar entre o sensor e o alvo, outras fontes de radiação TIR emitida e refletida em direção ao sensor, além da sensibilidade espectral, a capacidade radiométrica e da resolução espacial do sistema sensor empregado. Dessa forma o desafio atual é reside na detecção de informações de qualidade e com maior precisão, utilizando-se dos recursos disponíveis.

#### **2.4.2 Fotogrametria com VANTs**

O uso de VANTs para levantamento fotogramétrico é vantajoso em relação à utilização de aeronaves, já que possuem a facilidade da repetição de voos constantes; maior riqueza de detalhes, devido à altitude mais baixa de operação; diminuição substancial dos custos de aquisição; entre outros (SANTOS, 2013). No entanto, a principal preocupação com relação a estas plataformas de imageamento ainda se centra na qualidade relativa à precisão de posicionamento para planimetria e altimetria em produtos oriundos deste tipo de levantamento.

Há limitações referentes ao uso de VANTs para o levantamento fotogramétrico, a saber: a) necessidade de maior quantidade de imagens para cobrir a mesma área; b) distorções geométricas significativas; c) dificuldade para conseguir a superposição corretamente pré-estabelecida; d) variação de controle sobre as fotografias, causada pela pouca precisão no conhecimento da posição e orientação da plataforma no momento da tomada de cada uma das fotografias; e) a não verticalidade do eixo óptico da câmera; f) a instabilidade da plataforma aérea sob condições ambientais adversas (vento); entre outras (SILVA et al., 2005; LUZ, 2015). Entretanto, com o aperfeiçoamento tanto dos sistemas sensores, quanto das plataformas não tripuladas que vêm sendo empregados para esta finalidade, o uso de VANTs para fotogrametria vem crescendo significativamente.

Para a fotogrametria a partir de VANTs, a plataforma utilizada, em geral, é composta pelo sistema sensor a ser utilizado, um sistema receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que irá fornecer informações de posicionamento para cada imagem coletada ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) e permitir que a rota pré-estabelecida seja realizada; um sistema inercial, denominado “Unidade de Medição Inercial” (IMU), que é composto por giroscópios, acelerômetros, barômetros e bússola, que fornecem os ângulos de Euler ( $\omega$ ,  $\varphi$  e  $k$ ) de cada imagem coletada, e ainda, uma controladora de voo que irá gerenciar todos os demais sistemas.

Ao lado da praticidade do levantamento de imagens utilizando este tipo de plataforma, diversos *softwares* têm implementado processos fotogramétricos para a geração de modelos digitais de superfície e ortomosaicos a partir dos dados coletados por VANT. Estes *softwares* desenvolvidos para o processamento de imagens de VANT possuem uma automatização muito maior se comparados com *softwares* clássicos de fotogrametria, devido à utilização de algoritmos mais completos que permitem o processamento de muitas imagens em pouco tempo. Eles são otimizados e de operação simples para a geração de produtos, contudo, com menos controle sobre os passos de processamento e sobre a precisão dos parâmetros de orientação geométrica.

Em geral, tais *softwares* exigem como entrada apenas as imagens e as suas coordenadas centrais. Os parâmetros de calibração da câmera (orientação interior) e três dos parâmetros de orientação exterior, os ângulos de Euler ( $\omega$ ,  $\varphi$  e  $k$ ), são opcionais, porque os algoritmos podem determiná-los implicitamente na triangulação aérea e no ajuste do bloco, embora com baixa precisão.

O processamento fotogramétrico automático consiste basicamente nos procedimentos de obtenção dos parâmetros de orientação, fototriangulação por feixes perspectivos, ortorretificação, reamostragem e geração do modelo digital de superfície (MDS) e do ortomosaico. Tais procedimentos, como já mencionado, podem ser efetuados apenas com coordenadas centrais das imagens fornecidas pelo sistema GNSS integrado. No entanto, para obter maior precisão, recomenda-se utilizar pontos de controle em solo (*Ground Control Points* - GCP) e para avaliação, pontos de controle de qualidade, ou pontos de checagem (*Independent Check Points* – ICPs)..

A partir dos pontos de controle e pontos de checagem, estes *softwares* emitem um relatório de qualidade do produto resultante. A qualidade dependerá de uma série de fatores, que podem ser referentes à coleta das imagens (sensor utilizado), aos pontos de controle obtidos por GNSS em solo, ajustamentos dos parâmetros coletados pelo GNSS e sistema inercial embarcados, variação da plataforma, processamento dos dados, entre muitos outros.

De qualquer forma, para a utilização de produtos aerofotogramétricos, sobretudo aqueles oriundos de processamentos automáticos, é imprescindível que este seja avaliado e classificado quanto à exatidão posicional, e em relação à escala e objetivo pretendidos.

## **2.5 Qualidade em produtos cartográficos**

A qualidade dos produtos cartográficos no Brasil tem sido atestada pela capacidade de representar o mais fielmente possível todas as feições da área mapeada, cumprir sua função enquanto carta e se enquadrar nos padrões determinados para o mapeamento em

território nacional, dentre eles o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (DALMOLIN; LEAL, 2001), estabelecido pelo Decreto 89.817 de 20 de junho de 1984 (BRASIL, 1984).

Na última década, o conceito de avaliação da qualidade tem sido visto em uma perspectiva mais ampla, tornando-se uma grande preocupação no mapeamento com produtos cartográficos digitais (ROBERTO, 2013). Estes produtos, ao mesmo tempo em que derivam de processamentos otimizados, por vezes têm a preocupação com a sua qualidade minimizada.

No que se refere à avaliação da qualidade de ortofotos digitais, Rocha (2002) considera os parâmetros que analisam a qualidade posicional das informações, a época com que os dados foram obtidos, o tipo de dado a ser representado, a estrutura da representação, suas interligações e a simbologia empregada na representação. Dentre estes, o autor ressalta a qualidade da exatidão posicional como sendo o principal parâmetro a ser analisado. A exatidão posicional<sup>3</sup> é adotada por vários autores como sinônimo de acurácia, ou seja, o afastamento que, como um todo, a ortofoto teria da verdade topográfica. Na avaliação da exatidão posicional os erros são avaliados em relação aos conceitos de: precisão, que se refere à dispersão de valores observados considerando apenas os erros aleatórios; e tendência que é resultante dos erros sistemáticos (ANDRADE, 1998; ROCHA, 2002; LUZ, 2015).

Assim, com base nos clássicos trabalhos de Merchant (1982), Brito (1987), Tommaselli et al. (1988) e Galo e Camargo (1994), diversos trabalhos vêm utilizando o conceito de exatidão posicional, através de teste de precisão e tendência, para analisar erros observados nos produtos cartográficos digitais e contrapô-los aos valores de erro padrão, estabelecidos pelas leis e normas vigentes, a fim de, em uma determinada escala, classificar a qualidade do produto analisado.

---

<sup>3</sup> Neste trabalho tal conceituação para exatidão posicional foi adotada.

### 2.5.1. Padrão de Exatidão Cartográfica

Como já mencionado, o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) foi estabelecido pelo Decreto 89.817 de 20 de junho de 1984. Segundo o artigo 8º deste Decreto, a classificação das cartas quanto à sua exatidão deve obedecer a seguinte norma:

“Noventa por cento dos pontos bem definidos em uma carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfico – Planimétrico estabelecido” (BRASIL, 1984).

O PEC é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão (Equação 2.18).

$$PEC = 1,6449 \times EP \quad (2.18)$$

onde: *PEC* corresponde ao Padrão de Exatidão Cartográfica; *EP* corresponde ao Erro Padrão podendo ser equivalente às expressões do Desvio Padrão e Erro Médio Quadrático.

Com vistas a uma nova era de produtos cartográficos, em sua maioria digitais, em junho de 2011, a Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) criou a norma de Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) (CONCAR-EB, 2011). Esta norma criou um novo indicador estatístico, o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Este novo indicador tem como objetivo complementar os padrões de precisão e exatidão estabelecidos no Decreto acima mencionado (BRASIL, 1984), pois este já não atendia às necessidades atuais, aplicadas à era digital. Nesse sentido, passou-se a considerar que, com o avanço tecnológico, foram eliminados erros inerentes aos processos antigos e inserindo-se erros menores derivados dos processos atuais (PEREIRA; NERO, 2012).

O indicador continua a ser calculado pelo produto do desvio padrão, e a constante 1,6449, em um nível de confiança de 90%. Contudo, uma nova classe de exatidão foi criada, sendo agora os produtos cartográficos classificados nas classes A, B, C e D.

Dessa forma, as classes “B”, “C” e “D” correspondem, nessa ordem, às classes “A”, “B”, “C” do PEC Planimétrico previstas no Decreto de 1984.

Assim, para avaliar um produto cartográfico digital de acordo com a ET-ADGV, calcula-se o PEC-PCD com base no erro padrão das amostras e compara-se com o valor correspondente à escala do produto. A norma apresenta os valores do PEC-PCD para as seguintes escalas: 1:1.000, 1:2.000, 1:5.000, 1:10.000, 1:25.000, 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000.

Os valores referentes ao padrão de exatidão cartográfica (PEC) e erro padrão (EP) para avaliação planimétrica e altimétrica nas respectivas escalas de acordo com o PEC (BRASIL, 1984) e o PEC-PCD (CONCAR-EB, 2011) estão representados nas Tabelas 2.2 e 2.3, a seguir.

Tabela 2.2 - Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria dos produtos cartográficos digitais.

PEC	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,0	8,51	28,0	17,02	70,0	42,55
A	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,0	15,0	50,0	30,0	125,0	75,0
B	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,0	25,0	80,0	50,0	200,0	125,0
C	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,0	30,0	100,0	60,0	250,0	150,0

Fonte: CONCAR-EB (2011).

Tabela 2.3 - Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica para MDT, MDE e MDS para a produção de produtos cartográficos digitais.

PEC	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
A	B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
B	C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
C	D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Fonte: CONCAR-EB (2011).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Os procedimentos metodológicos deste trabalho foram divididos em duas etapas: de laboratório e de campo. Em laboratório, foram realizadas caracterizações dos sensores, a fim de conhecer as suas capacidades radiométricas, espectrais e espaciais. Em campo, os sensores caracterizados foram utilizados para a coleta de dados espaciais de alvos distintos, de forma manual e embarcado em VANT.

Para as etapas de laboratório, a metodologia adotada teve como base os procedimentos adotados por LIMA FILHO (2013; 2015) e ALMEIDA (2007). Em campo, os procedimentos se fundamentaram em trabalhos similares desenvolvidos por: LUZ (2015) e NOGUEIRA et al. (2017). A descrição detalhada dos procedimentos metodológicos realizados em cada etapa será apresentada mais adiante.

#### **3.1 Material**

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois sensores termais, um VANT quadricóptero, uma estação meteorológica portátil e alvos de referência. As especificações e informações técnicas de cada um destes serão apresentadas nas seções a seguir.

Além destes, nos procedimentos laboratoriais foram utilizados:

- Corpo Negro Extenso de área extensa, modelo SR800 da CI Systems (CI SYSTEMS, 2004);
- Monocromador Acton SpectraPro 2500i (ACTON RESEARCH 2003);
- Fonte de infravermelho (elemento resistivo denominado Globar);
- Sensor de banda larga de referência J15D16 da empresa Judson (JUDSON TECHNOLOGIES LLC, 2002);
- Termo-higromêtro.

Os itens listados acima são de propriedade do Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos - LaRaC, do Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica (IEAv).

### 3.1.1 Sensores

Os sensores utilizados foram: OPTRIS PI 450 W (Figura 3.1) e FLIR A310 (Figura 3.2), que serão doravante denominados como Sensores A e B, respectivamente.

Figura 3.1 - Kit Optris PI LightWeight (a) Microprocessador e (b) Sensor IV termal Optris PI450 LW.



Fonte: OPTRIS (2016).

Figura 3.2 - Sensor FLIR modelo A310.



Fonte: FLIR SYSTEMS (2016).

O Sensor A possui características específicas como massa (220 g) e dimensões (46×56×84 mm), que o permitem ser embarcado em VANTs. Já o Sensor B tem massa (700g) e dimensões (170×70×70 mm) maiores e é mais indicado para ambientes laboratoriais e/ou ser embarcado em aeronaves tripuladas.

Apesar de projetados para diferentes aplicações, estes sensores térmicos detectam a radiação eletromagnética infravermelha termal na mesma faixa espectral, de 7,5 a 13,0  $\mu\text{m}$ . O Sensor A possui uma matriz de imagem de 382×288 *pixels*, e o Sensor B de 320×240 *pixels*. As imagens térmicas obtidas por ambos os sensores são armazenadas na resolução radiométrica de 16 bits e, de acordo com as especificações dos fabricantes, ambos os sistemas possuem precisão de  $\pm 2^\circ\text{C}$  ou  $\pm 2\%$  (OPTRIS, 2016; FLIR SYSTEMS, 2016). As especificações técnicas dos dois sistemas sensores estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificações técnicas dos sensores a serem calibrados.

<b>Dados de imageamento e ópticos</b>	<b>Sensor A</b>	<b>Sensor B</b>
Número de <i>pixels</i>	382×288	320×240
Campo de visada (FOV)	62° x 49°	25° × 18.8°
Distância focal	8 mm	18 mm (0,7 in.)
Resolução espacial (IFOV)	3,14 mrad	1,36 mrad
Sensibilidade térmica/NETD	0,04 K	0,05 K
Frequência	80 Hz	9 Hz
<b>Dados do detector</b>		
Tipo do detector	UFPA, microbolometro	UFPA, microbolometro
Faixa espectral	7,5–13 μm	7,5 -13 μm
Tamanho do <i>pixel</i>	25 μm	25 μm
<b>Medição</b>		
Faixa de temperatura do objeto	0...250 °C (utilizada)	-20... +120°C (utilizada)
Incerteza	±2°C ou ±2%	±2°C ou ±2 %

Fontes: OPTRIS (2016), FLIR SYSTEMS (2016).

É importante lembrar que estes sensores permitem a entrada de dados da emissividade da superfície que está sendo medida e da temperatura ambiente. Com isto, segundo informações dos fabricantes, estes equipamentos permitem inferir a temperatura termodinâmica da superfície que está sendo medida.

### 3.1.2 Veículo aéreo não tripulado

A aeronave utilizada para capturar as imagens foi um multi-rotor do tipo quadricóptero (Figura 3.3). Esta foi montada com uma controladora de voo *ArduPilot*, que é uma plataforma de código aberto para aeronaves pequenas, integrada com um sistema GNSS, para posicionamento, e o sensor termal OPTRIS PI450.

Figura 3.3 - Multirrotor quadricóptero utilizado na coleta de imagens.



Fonte: a própria autora.

### 3.1.3 Alvos de Referência

Com o intuito de identificar pontos previamente medidos por GNSS em solo nas imagens termais, foram utilizados quatro refletores de canto (*corner reflectors*) e onze placas de alumínio, material de baixa emissividade, como alvos de referência (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Alvos de referência utilizados nos experimentos de campo.



Fonte: a própria autora.

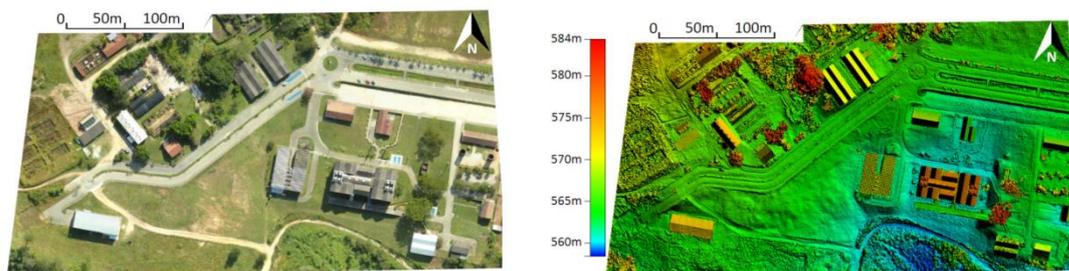
As placas também foram utilizadas para a delimitação dos alvos urbanos medidos em campo pelos dois sensores termais no experimento descrito na seção 3.3.2.

### 3.1.4 Ortomosaico e MDS de referência

Para a realização da avaliação posicional do ortomosaico termal e do MDS gerados a partir da coleta de dados termais por VANT, pontos de verificação foram extraídos de um ortomosaico e um MDS de referência (Figura 3.5). Estes produtos foram gerados por Nogueira et al. (2017) e cedidos para utilização nesta pesquisa.

Segundo os autores os produtos foram gerados a partir de imagens coletadas por um sensor RGB (FC330 com 12MP) a bordo do VANT Phantom 4, do tipo quadricóptero, da DJI. O sobrevoo foi realizado no dia 18 de junho de 2016 no campus da Universidade do Vale do Paraíba, em uma área de aproximadamente 15 hectares, dentro da qual a área de estudo desta pesquisa encontra-se situada. O processamento dos dados foi realizado no *software* Pix4D com sete pontos de controle (GCP) coletados por GNSS e avaliados quanto à exatidão posicional a partir de 40 pontos de checagem.

Figura 3.5 – Ortomosaico e Modelo de Superfície utilizados como referência para a avaliação posicional.



Fonte: Nogueira et al. (2017).

Analisados quanto ao PEC-PCD, os produtos receberam classe A para a escala 1:1.000 na vertente planimétrica e A para a escala 1:500 na vertente altimétrica.

Assim, com base no trabalho de Merchant (1982) e Tommaselli et al. (1988) onde se ressalta que a precisão requerida para os pontos de controle e verificação deve ser 1/3 da precisão desejada para o ortomosaico, conclui-se que o uso de pontos extraídos destes produtos de referência possibilitam a avaliação planimétrica de produtos a partir da escala 1:3.000 e altimétrica a partir de 1:1.500.

A adoção desta metodologia de coleta de pontos de verificação em produtos de referência foi necessária, uma vez que não havia na área analisada a quantidade mínima de pontos coletados por GNSS recomendados por Merchant (1982) para este tipo de avaliação, que exige pelo menos 20 pontos escolhidos de forma homogênea e abrangente na área.

### 3.2 Experimentos laboratoriais

Com base nos fundamentos descritos nas Seções 2.2.3, 2.2.4 e 2.2.5, foram realizados três experimentos metodológicos com o intuito de realizar uma precisa avaliação dos sensores termais utilizados nas etapas de campo, a saber: 1) caracterização espectral; 2) caracterização espacial; 3) caracterização radiométrica.

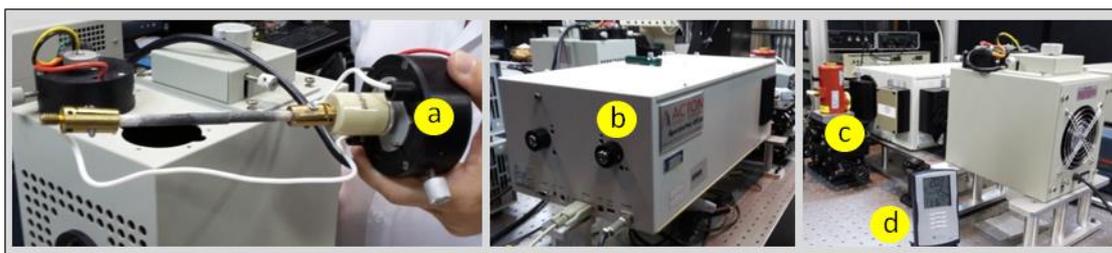
Para a realização destes experimentos, foram utilizadas as instalações e equipamentos do Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos - LaRaC, do Instituto de Estudos Avançados - IEAv, em São José dos Campos/SP. A descrição dos procedimentos metodológicos de cada experimento laboratorial será apresentada a seguir.

### 3.2.1 Caracterização espectral

Para a caracterização espectral, foram utilizados os seguintes equipamentos: uma fonte de infravermelho (elemento resistivo denominado Global) (Figura 3.6-a); um monocromador Acton Spectra Pro 2500i (ACTON RESEARCH, 2003) (Figura 3.6-b); um *chopper*, que tem por objetivo impedir ou permitir a passagem da radiação eletromagnética da fonte infravermelha, e um sensor de banda larga de referência J15D16 da empresa Judson (JUDSON TECHNOLOGIES LLC, 2002) (Figura 3.6-c). Além disso, durante as medições, foi utilizado um termo-higromêtro para monitorar as condições de temperatura, umidade, concentração de CO<sub>2</sub> e pressão (Figura 3.6-d).

Dois conjuntos de medidas foram realizados. No primeiro, por meio de medições manuais, o sensor a ser caracterizado teve o centro da sua lente iluminada pela saída do monocromador, e foram realizadas medições duplas (*chopper* aberto, que permite a passagem da radiação do iluminador para o monocromador, e fechado, que impede a passagem da radiação) nos diversos comprimentos de onda, conforme Figura 3.7. A quantidade de medições depende da relação entre o tempo (e o esforço) disponível e a “suavização” da FRE desejada. No segundo conjunto de medições, obtidas automaticamente por um sistema de aquisição de dados, foi utilizado um sensor de referência da marca Judson de propriedade do LaRaC.

Figura 3.6 - a) Global; b) Monocromador; c) sensor de referência Judson J15D16; e d) termo-higromêtro.



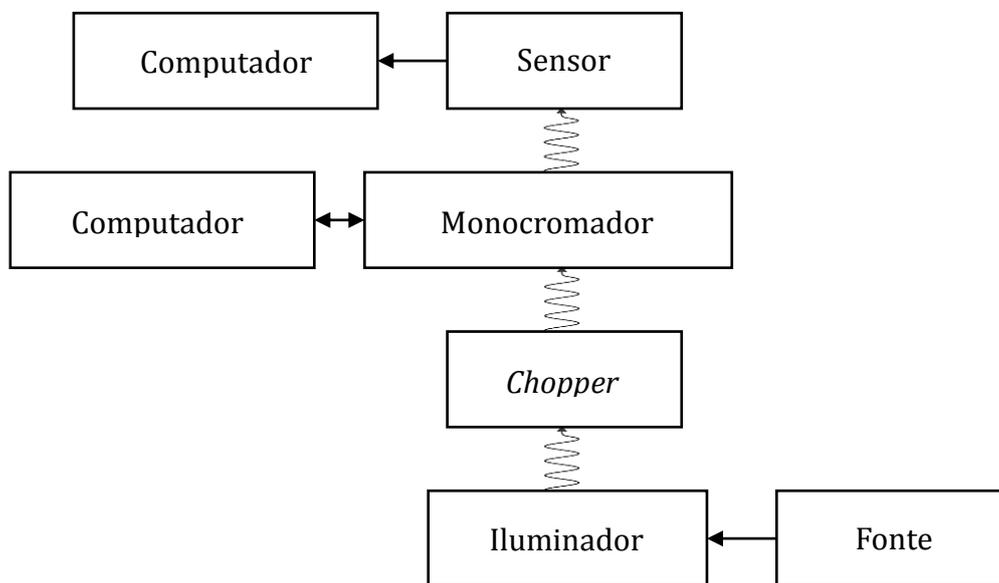
Fonte: a própria autora.

As medições dos dois conjuntos foram tomadas no mesmo dia, com a menor diferença de tempo possível, para que as condições experimentais não se alterassem significativamente. Além disso, para facilitar a análise dos dados, as medições foram realizadas nos mesmos comprimentos de onda.

Os dois Sensores, A e B, foram submetidos a este experimento. Para cada um, foram obtidas medidas de 6,5 a 14,0  $\mu\text{m}$ , com intervalo de 0,1  $\mu\text{m}$ , resultando em 76 diferentes

comprimentos de ondas. Conforme recomendação dos fabricantes respeitou-se o tempo de aquecimento dos equipamentos, superior a 30 minutos, nos procedimentos laboratoriais.

Figura 3.7 - Organização experimental utilizada na caracterização espectral dos sensores.



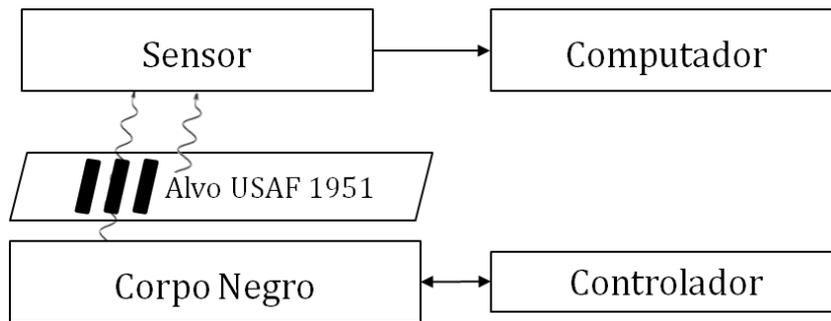
Fonte: a própria autora.

### 3.2.2 Caracterização espacial

Para a caracterização espacial, o arranjo experimental (Figura 3.8) envolveu, além dos sensores a serem caracterizados, um CN de Área Extensa modelo SR800 da CI Systems (CI SYSTEMS, 2004) (Figura 3.9-a) e um alvo padrão USAF 1951 (APPLIED IMAGE, 2005) (Figura 3.9-b), construído no próprio IEAv (LIMA FILHO, 2015). Assim, o sensor a ser caracterizado foi posicionado perpendicularmente, a uma distância conhecida, da superfície do alvo fixado ao CN, sendo obtidas imagens (Figura 3.9-c).

Como na caracterização espectral, todos os equipamentos tiveram o tempo de aquecimento superior a 30 minutos, conforme recomendação dos fabricantes. A temperatura termodinâmica do CN foi ajustada a 25 °C e posteriormente de 30 °C a 80 °C, com intervalos de 10 °C. A fim de se aguardar a estabilização da temperatura do CN, entre cada ajuste de temperatura aguardou-se cerca de 15 minutos para obtenção da imagem seguinte.

Figura 3.8 - Organização experimental utilizada na caracterização espacial do sensor.



Fonte: a própria autora.

Figura 3.9 - a) Corpo Negro de Área Extensa, modelo SR800 da CI Systems; b) Corpo Negro com alvo padrão USAF 1951 acoplado, c) Visualização do *software* durante a realização da medida pelo sensor.



Fonte: a própria autora.

Este experimento foi realizado com os dois sensores (A e B). Após a coleta das imagens, foram calculadas a função de transferência de contraste e a frequência de Nyquist, conforme metodologia descrita na seção 2.2.5.

O alvo utilizado neste experimento foi construído para uso na caracterização de outro sensor termal realizada por Lima Filho (2015). Assim, os valores de pares de linhas por metro e as respectivas incertezas derivadas da medição do alvo, já anteriormente calculadas por este autor, foram utilizados neste trabalho.

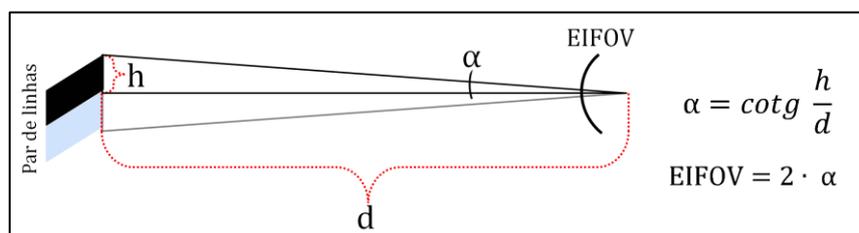
Tabela 3.2 - Valores de pares de linhas/ metro.

Nº do Elemento	Tamanho real dos pares (mm)	Pares de linha (m)	Nº do Elemento	Tamanho real dos pares (mm)	Pares de linha (m)
1°	21,6 ± 0,03	46,3 ± 0,06	13°	5,4 ± 0,03	185 ± 0,3
2°	19,2 ± 0,03	52 ± 0,06	14°	4,8 ± 0,03	208 ± 0,4
3°	17,1 ± 0,03	58,3 ± 0,06	15°	4,3 ± 0,03	233 ± 0,5
4°	15,3 ± 0,03	65,5 ± 0,07	16°	3,8 ± 0,03	262 ± 0,7
5°	13,6 ± 0,03	73,5 ± 0,07	17°	3,4 ± 0,03	294 ± 0,8
6°	12,1 ± 0,03	82,5 ± 0,08	18°	3 ± 0,03	330 ± 1,1
7°	10,8 ± 0,03	92,6 ± 0,1	19°	2,7 ± 0,03	370 ± 1,3
8°	9,6 ± 0,03	103,9 ± 0,12	20°	2,4 ± 0,03	416 ± 2
9°	8,6 ± 0,03	116,7 ± 0,14	21°	2,1 ± 0,03	467 ± 2
10°	7,6 ± 0,03	130,9 ± 0,17	22°	1,9 ± 0,03	524 ± 3
11°	6,8 ± 0,03	147 ± 0,21	23°	1,7 ± 0,03	588 ± 3
12°	6,1 ± 0,03	165 ± 0,3	24°	1,5 ± 0,03	660 ± 4

Fonte: LIMA FILHO (2015).

A partir da função de transferência de contraste e da frequência de Nyquist calculadas, a modulação mínima necessária para produzir uma resposta no sistema (AIM) pôde ser encontrada. Dessa forma, conhecendo a dimensão em metros de uma linha ( $h$ ) do último elemento resolvido e a distância entre o sensor e o alvo ( $d$ ), foi possível calcular o campo efetivo de visada (EIFOV) do sensor através de relação trigonométrica, conforme ilustrado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Relação trigonométrica para determinação do EIFOV.



Fonte: a própria autora.

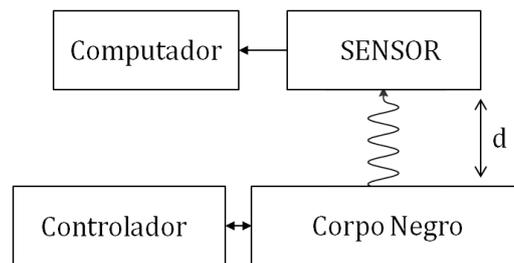
### 3.2.3 Caracterização radiométrica

Na caracterização radiométrica laboratorial, também foi utilizado o Corp Negro de Área Extensa, modelo SR800 da CI Systems (CI SYSTEMS, 2004) (Figura 3.9-a), que teve sua temperatura termodinâmica ajustada a cada medição. Também foi utilizado um termo-higrômetro para monitorar as condições de temperatura do ar, umidade, concentração de CO<sub>2</sub> e pressão, durante as medições (Figura 3.6-d).

Nesta caracterização, para cada sensor a ser caracterizado, foram realizadas medições da radiação proveniente do CN. Conforme o diagrama do arranjo experimental (Figura

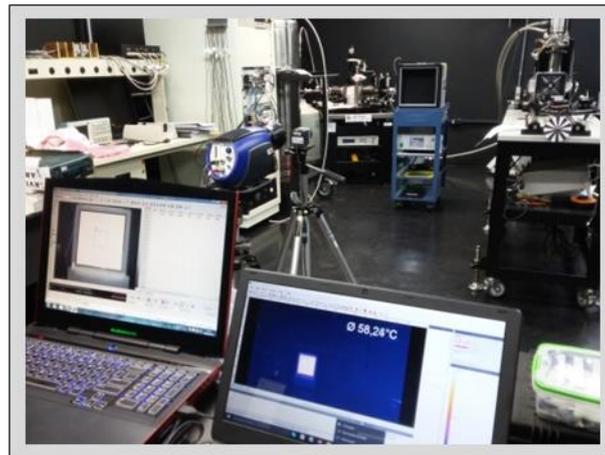
3.11), os sensores foram posicionados perpendicularmente à superfície do CN a uma distância de 1,70 e 1,57 m, respectivamente (Figura 3.12). Novamente, nas medições realizadas todos os equipamentos tiveram o tempo de aquecimento, superior a 30 minutos, respeitado. A temperatura termodinâmica CN foi então ajustada de 10 a 80 °C, de 5 em 5 °C, respeitando-se um intervalo de tempo de 15 minutos entre as coletas para a estabilização da temperatura termodinâmica da superfície do equipamento.

Figura 3.11 - Diagrama do arranjo experimental utilizado para a obtenção de medidas radiométricas.



Fonte: a própria autora.

Figura 3.12 - Arranjo experimental para a caracterização radiométrica.



Fonte: a própria autora.

O valor da radiância proveniente do CN que se esperava chegar ao sensor foi obtido a partir da integração da equação de Planck (Equação 13).

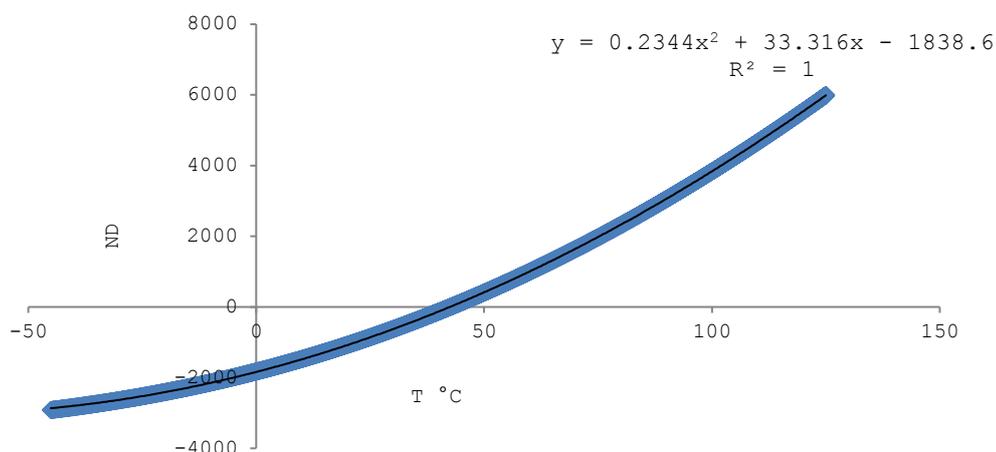
Nos dois sensores caracterizados, o dado é disponibilizado em valor de temperatura radiante em graus celsius. Assim, a mesma equação (Equação 2.14) foi utilizada para obter os valores de radiância medidos pelo sensor. Em que, para  $T_{CN}$ , foram utilizados valores de temperatura radiante medidos por cada sensor.

A fim de corrigir os dados obtidos a partir dos sensores, foi necessário adicionar a parcela referente à radiância emitida pelo ambiente que reflete na superfície do CN em direção ao sensor. Isso ocorreu porque a emissividade da superfície do CN, segundo o fabricante, é considerada igual a 0,98.

Na caracterização radiométrica, objetivou-se analisar o comportamento da relação entre valores de radiância que chegam ao sensor e o número digital (ND) atribuído a ele.

O sinal elétrico gerado pelos detectores sensibilizados é amplificado, filtrado e, eventualmente, corrigido e registrado em número digital (ND). No entanto, como já mencionado, os dados fornecidos pelos sensores utilizados são disponibilizados apenas em graus celsius. Para a obtenção dos dados primários (em ND) para o Sensor A, utilizou-se a relação entre ND e temperatura radiante (°C) descrita pela função de ajuste da curva (Figura 3.13), disponibilizada pelo fabricante junto ao material de instalação do *software*.

Figura 3.13 - Relação entre ND e temperatura radiante (°C) disponibilizada pelo fabricante.



Fonte: OPTRIS (2016).

O fabricante do Sensor B não disponibilizou a curva de conversão e, portanto não foi possível estabelecer a relação dos dados radiométricos com os números digitais (ND) para este sensor. Desse modo, a relação foi estabelecida com valores de temperatura.

A partir dos valores de radiância e temperatura termodinâmica do CN, e temperatura radiante fornecida pelos sensores, foi possível caracterizá-los radiometricamente.

Além do comportamento da relação entre valores de radiância que chegam ao sensor e o número digital (ND) atribuído a ele, buscou-se analisar a diferença entre a temperatura

radiante medida pelos sensores e o valor da temperatura termodinâmica ajustada no corpo negro.

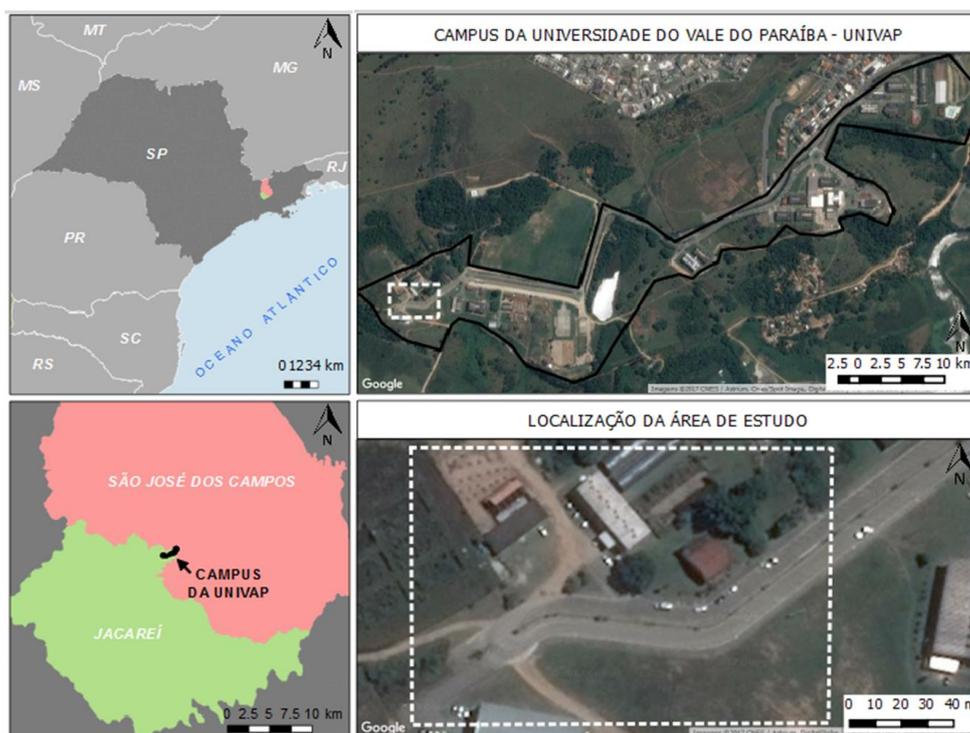
Para a análise da diferença de temperatura, foi escolhida uma região da imagem em temperatura do CN com maior uniformidade entre os *pixels*. Para esta região, foi calculada a média e o desvio padrão dos *pixels* e, em seguida, a diferença entre a média obtida e o valor ajustado no CN.

### 3.3 Experimentos de Campo

#### 3.3.1 Área de Estudo

A área de estudo de campo foi dentro do campus da Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), localizada no limite entre São José dos Campos e Jacareí, municípios localizados na região do vale do Paraíba, estado de São Paulo, Brasil (Figura 3.14).

Figura 3.14 - Localização da área de estudo.



Fonte: a própria autora.

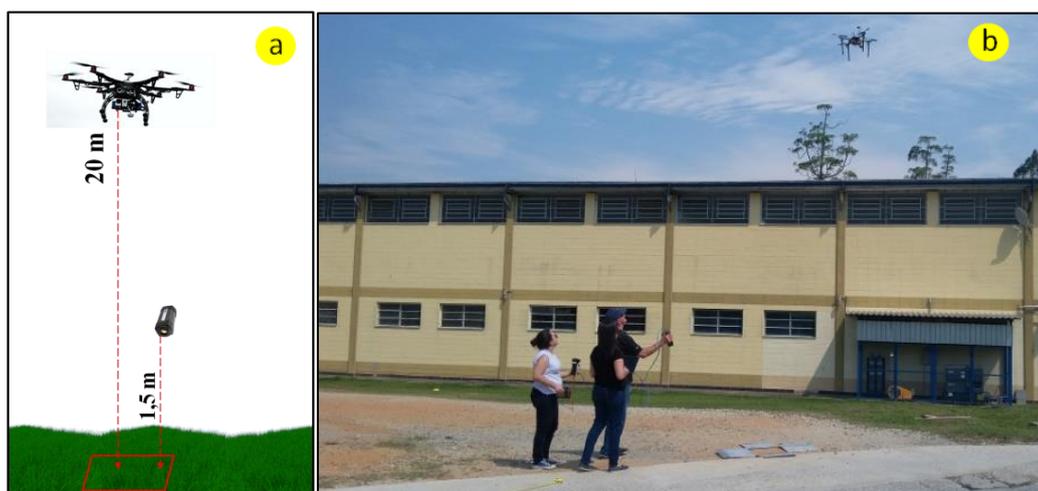
A área de estudo conta com grande diversidade de materiais de coberturas, e os principais são: solo exposto, vegetação rasteira, arbustiva e arbórea, bloquete de

concreto, calçada de concreto e construções com coberturas metálicas e de cerâmica. Os experimentos foram realizados no dia 19 de setembro de 2016, domingo, quando não havia circulação de pessoas estranhas ao projeto na área sobrevoada.

### 3.3.2. Medição de Alvos em Campo

Uma das etapas de campo consistiu na medição simultânea de quatro superfícies com diferentes materiais de cobertura a partir de dois sensores termais que operam na mesma faixa do espectro eletromagnético, já previamente caracterizados em laboratório.

Figura 3.15 - Configuração da coleta de dados para o experimento de intercalibração radiométrica. a) Croqui (imagem sem escala real); b) Foto do experimento.



Fonte: a própria autora.

O Sensor A foi embarcado em um veículo aéreo não tripulado e obteve medidas a uma altura média de 20 m da superfície. O Sensor B obteve medidas a aproximadamente 1,5 m da superfície imageada e foi operado manualmente.

As superfícies alvo do imageamento foram escolhidas com base na diversidade de materiais de cobertura, a saber: calçada de concreto, via de bloquetes de concreto intertravados, via de solo exposto e área de vegetação rasteira (grama), conforme Figura 3.16. Utilizaram-se placas de alumínio a fim de determinar o limite da área a ser imageada pelos dois sensores.

Figura 3.16 - Alvos analisados: a) calçada de concreto, b) bloquete de concreto, c) solo exposto e d) superfície com vegetação rasteira (grama).



Fonte: a própria autora.

Ambos os sensores registram os valores medidos apenas em temperatura em graus celsius. Para as análises, os dados coletados foram corrigidos pelas equações derivadas na etapa de caracterização radiométrica descrita na Seção 3.2.3. Da caracterização, duas equações foram utilizadas: uma de calibração, que corrige os valores de temperatura registrados, e outra que converte valores de temperatura para radiância. Outra correção, esta aplicada apenas aos dados obtidos por VANT, foi realizada utilizando parâmetros atmosféricos estimados por um modelo de transferência radiativa e está descrito adiante.

Os dados foram obtidos simultaneamente pelos sensores para cada um dos alvos, e os valores medidos foram ajustados de acordo com o horário da aquisição de cada imagem. Assim, uma vez corrigidos quanto aos desvios radiométricos dos sistemas sensores e influência atmosférica, espera-se que ambos forneçam valores de temperatura e radiância aproximados para cada alvo em um determinado instante.

Neste experimento, os valores de emissividade dos alvos não foram considerados para correção, visto que as comparações referem-se aos valores medidos pelos sensores de um mesmo alvo, e assim, estes já são obtidos em função da mesma taxa de emissão do alvo. Além da correção radiométrica, parâmetros atmosféricos foram estimados a partir do modelo de transferência radiativa (*Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance algorithm and computer model* - MODTRAN) no software PCModWin

(ONTAR, 2011) para corrigir valores medidos pelo Sensor A, a bordo do VANT, para valores de radiância de superfície.

O MODTRAN é um dos algoritmos mais conhecidos e utilizados na modelagem da transferência radiativa atmosférica, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisas da Força Aérea dos Estados Unidos (ANDRADE, 2011). Através deste, é possível estimar os parâmetros que possuem maior contribuição para os efeitos da atmosfera, utilizando modelos de atmosfera padrão e/ou inserindo dados externos.

O modelo de atmosfera assumido foi o de médias latitudes; a estação adotada foi verão; o modelo de aerossol assumido foi o urbano com visibilidade de 5 km, e a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) foi de 360 ppm. Alguns parâmetros atmosféricos coletados em campo também foram inseridos no modelo (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Parâmetros atmosféricos coletados em campo e utilizados no modelo.

Temperatura do ar	26,4 °C
Pressão atmosférica	946 mb
Umidade relativa do ar	62 %

Os parâmetros estimados e utilizados para a correção dos dados medidos pelo Sensor A foram: transmitância atmosférica ( $\tau$ ), radiância ascendente ( $L_a$ ) e radiância descendente ( $L_d$ ). Os valores oriundos do modelo foram ponderados pela FRE do sensor, e a radiância descendente multiplicada pela reflectância média dos alvos, esta que é dada por 1 (um) menos a emissividade, conforme derivação apresentada na Seção 2.1.4.

Para o Sensor B, com medições a apenas 1,5 m dos alvos, a transmitância atmosférica foi considerada 1 (um), e os demais parâmetros muito próximos a 0 (zero), e por isso, foram desprezados. Assim, as medidas realizadas pelo Sensor B, após correção pela equação de conversão radiométrica, foram adotadas como referência, e então comparadas às medidas do Sensor A, estas corrigidas pela equação de conversão e pelos parâmetros atmosféricos estimados no modelo.

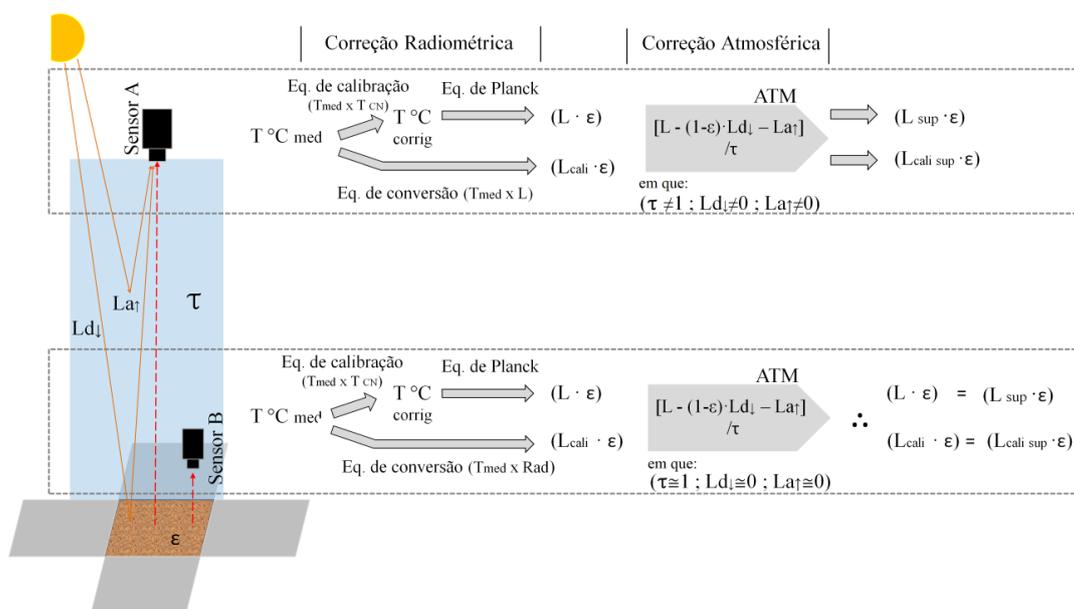
Como mencionado anteriormente, vale ressaltar que os valores de temperatura de brilho/aparente fornecidos, pelos sensores A e B, dependem da medição da radiância e de parâmetros ajustados nos sensores (temperatura ambiente e emissividade do alvo) e da sua temperatura interna. Também é conveniente lembrar que as equações de

conversão que utilizam tais parâmetros não são fornecidas pelos fabricantes e, portanto, do efeito destas não se tem conhecimento.

Ambos os sensores foram caracterizados radiometricamente em laboratório com base em um CN de referência e assim, conforme descrito na secção 4.3, observou-se que estes apresentam um pequeno desvio no valor de temperatura aparente registrado em relação à temperatura termodinâmica do corpo negro de área extensa. Desta análise resultaram as equações de calibração radiométrica para cada um dos sensores que permitiram a correção dos dados medidos em campo.

Na Figura 3.17, pode-se observar a sequência das correções realizadas sobre os dados de temperatura aparente medida pelos sensores. A partir destas correções, foram obtidos valores de radiância por dois métodos, conforme a bifurcação representada na Figura 3.17. No primeiro método, os valores de temperatura aparente fornecidos pelos sensores foram corrigidos pela equação de calibração obtida na etapa laboratorial de caracterização radiométrica, e posteriormente foram transformados para radiância, denominada ( $L$ ), através da equação de Planck. No segundo método, os dados fornecidos pelos sensores foram convertidos para radiância, denominada ( $L_{cali}$ ), a partir da equação de conversão também obtida através dos experimentos laboratoriais. A partir dos valores resultantes destes diferentes níveis de correção, as análises comparativas puderam ser realizadas.

Figura 3.17 – Composição da radiação captada pelos sistemas sensores e sequência de correções realizadas sobre os dados medidos pelos sensores.



Fonte: a própria autora.

Para a análise, ainda precisa ser considerada a incerteza final da medição. Esta é estimada a partir da incerteza do instrumento sensor ( $\sigma_{inst}$ ) e do desvio padrão da média ( $\sigma_m$ ), conforme Equação 3.1:

$$\sigma_f = \sqrt{(\sigma_m)^2 + (\sigma_{inst})^2} \quad (3.1)$$

A incerteza dos dois instrumentos sensores utilizados no experimento é declarada pelos fabricantes como  $\pm 2$  °C,  $\pm 2$  %. O desvio padrão da média observado foi inferior a 0,25 °C para todos os alvos e dessa forma, sua contribuição para a incerteza final da medição pode ser desprezada. Assim a incerteza do instrumento foi assumida como a incerteza final ( $\sigma_f$ ) da medição.

### 3.3.3. Coleta de imagens com VANT

A coleta das imagens com VANT foi realizada em uma área de aproximadamente 10.000 m<sup>2</sup>. A distância de amostra do solo, mais conhecida como o tamanho do GSD (*Ground Sample Distance*), planejada foi de 10 cm. A partir dele foi possível determinar a altura em que o sensor deveria estar em relação à superfície.

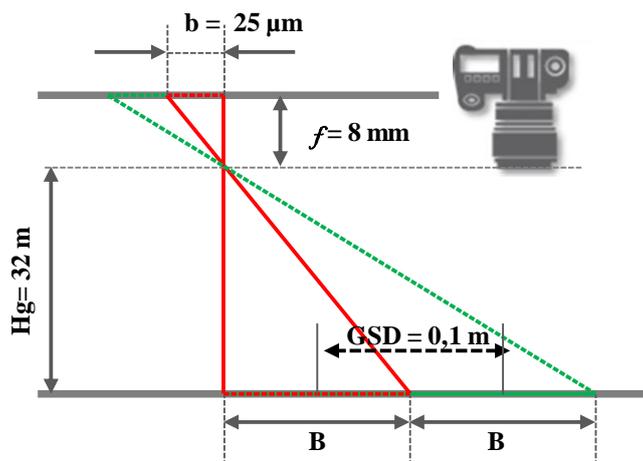
Para calcular a altura de voo ( $H_g$ ), foi necessário considerar os seguintes elementos: o tamanho do *pixel* ( $b$ ), a distância focal da câmera ( $f$ ) e o tamanho do GSD desejado ( $B$ ). De acordo com Santos (2013), pode-se considerar que a distância focal da câmera é a distância entre o sensor e o centro óptico da câmera, e a altura de voo é a distância entre o sensor e a superfície física da Terra, conforme ilustra a Figura 3.18.

Assim, a altitude de voo pode ser obtida pela equação a seguir:

$$H_g = \frac{B \cdot f}{b} \quad (3.2)$$

Para o Sensor A, a distância focal do sensor utilizado é de 8 mm e o tamanho físico do *pixel*, denominado Charge Coupled Device (CCD) traduzido literalmente como “Dispositivo de carga acoplada”, é de 25  $\mu$ m. Assim, para um GSD de 0,10 m a altitude de voo determinada foi de 32 m. Levando em consideração que a matriz da imagem deste sensor é de 382  $\times$  288 pixels, a dimensão calculada de cada imagem na superfície foi de 38,2  $\times$  28,8 m e área de aproximadamente 1.100 m<sup>2</sup>.

Figura 3.18 - Relação entre a distância focal da câmera, tamanho do *pixel* e tamanho do GSD para cálculo de altura do voo.



Fonte: a própria autora.

A partir do tamanho do GSD e dimensões da imagem no terreno, o planejamento de voo foi realizado de tal modo que os recobrimentos frontal e lateral fossem de 75% e 60%, respectivamente. Sendo possível, dessa forma, a identificação de pontos homólogos em várias imagens adjacentes.

O planejamento de voo foi executado no *software* Mission Planner 1.3.39 e resultou em três linhas de voo horizontais de aproximadamente 120 m e duas linhas verticais de 25 m (Figura 3.19). A velocidade média planejada para o recobrimento das imagens foi de 4 m/s, com obtenção de imagens em um intervalo de 1 segundo.

Figura 3.19 - Planejamento de voo no *software* Mission Planner.



Fonte: a própria autora.

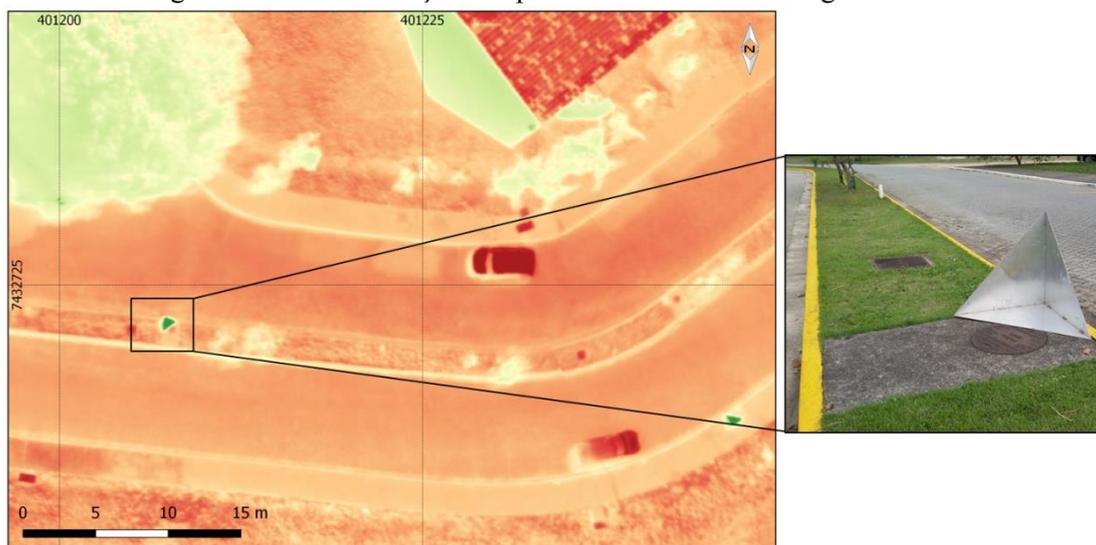
No VANT quadricóptero (descrito na Seção 3.1.2), foi integrado o Sensor A e um sistema GNSS para a obtenção das coordenadas, além de uma bateria e um sistema de

rádio para comunicação. No total, foram obtidas 71 imagens aptas a serem utilizadas para a geração do ortomosaico.

Antes da realização do voo, pontos de controle tiveram previamente suas coordenadas e altitudes medidas com GNSS em campo, sendo sinalizados na área a ser sobrevoada. Esta sinalização foi realizada utilizando *corner reflectors* e placas de alumínio (Figura 3.4). Tais alvos foram utilizados porque o material de sua composição tem baixa emissividade e possibilita uma boa visualização e identificação em imagens termais (Figura 3.20).

O objetivo de sinalizar os pontos termo-identificáveis foi proporcionar a coleta de coordenadas precisas nas imagens obtidas para posterior comparação com as coordenadas dos pontos de controle obtidos por GNSS em campo.

Figura 3.20 - Identificação dos pontos de controle na imagem termal.



Fonte: a própria autora.

O levantamento das coordenadas dentro da área do campus (Figura 3.21) foi realizado com GNSS de posicionamento estático e recebeu pós-processamento diferencial utilizando a estação SJSP da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo GNSS - RBMC, localizada no INPE, cerca de 10 km da base. Assim, os pontos coletados podem ser considerados como dispendo de precisão decimétrica. O levantamento, processamento e pós-processamento dos dados foi realizado pela equipe do Instituto de Estudos Avançados (IEAv).

Figura 3.21 - Coleta de dados com GNSS para pontos de controle e checagem.



Fonte: Grupo PITER/ IEAv (2016).

### 3.3.3.1 Geração dos ortomosaicos

Os dados coletados pelo sensor a bordo do VANT foram registrados em matrizes numéricas de valores de temperatura em graus celsius. Para processar esses dados em um *software* fotogramétrico, foi necessário realizar a sua conversão para o formato imagem (.tiff). Esse procedimento foi realizado no *software* Matlab R2014b. Também foi necessário associar cada imagem à sua coordenada correspondente obtida pelo sistema GNSS a bordo do VANT. Essa associação foi realizada com base no horário de obtenção de cada um destes dados e, para isso, o utilizou-se o *software* GeoSetter.

Uma vez que os dados foram pré-processados, estes foram inseridos no *software* Pix4D Mapper Pro (versão *trial*) (PIX4D, 2013). Trata-se de um *software* semiautomático para processamento fotogramétrico que realiza os seus procedimentos em três etapas: calibração, densificação de pontos, geração de MDS (modelo digital de superfície) e ortomosaico.

A primeira etapa do processamento inicia com a determinação de possíveis feições na fotografia que possam ser representadas por um ponto. Percorre-se a fotografia verificando se cada ponto escolhido possui homólogo, ou seja, se este ponto aparece em duas ou mais fotografias. Caso o ponto em estudo possua homólogo, ele é selecionado

para compor a aerotriangulação, caso contrário, o ponto é descartado. Processa-se a Triangulação Aérea (*Automatic Aerial Triangulation* - AAT) e o Ajuste de Feixes em Bloco (*Bundle Block Adjustment*, BBA) em conjunto com a calibração, e portanto, os valores iniciais dos parâmetros de orientação exterior e interior são ajustados. Ao final do processo, é gerado um relatório contendo uma série de informações sobre o ajuste realizado (ALVES JR et al., 2014).

A segunda etapa do processamento envolve a geração do MDS (Modelo Digital de Superfície). Com base na nuvem de pontos 3D obtidos durante a AAT e BBA, o programa gera o MDS, que dá origem ao MDT depois da filtragem dos pontos acima do solo e da interpolação com as regiões de vazios. O manual não indica o algoritmo ou os parâmetros utilizados na filtragem do MDS para a obtenção do MDT, ou como o mesmo é interpolado nas regiões sem informações (ALVES JR. et al., 2014).

A ortorretificação e a geração do ortomosaico são realizadas a partir da projeção e combinação das imagens originais com o MDT e consistem na terceira etapa dos processamentos (PIX4D, 2013).

O *software* também permite que sejam inseridas as coordenadas tridimensionais dos pontos de controle, se houver, e indicar sua posição em cada fotografia. Ao marcar o ponto de controle na fotografia, o programa ordena as fotografias iniciando com aquelas nas quais esse ponto pode aparecer (GCP). Tal inserção permite uma melhoria na geração da nuvem de pontos e, conseqüentemente, do ortomosaico final. Nesta etapa foram testados dois cenários, a fim de analisar a exatidão posicional nos ortomosaicos adquiridos com e sem os pontos de apoio em solo. Assim, o primeiro ortomosaico gerado não utilizou pontos de controle, e o segundo foi gerado utilizando quatro pontos de controle.

A análise estatística da avaliação de tendência e precisão posicional dos ortomosaicos gerados, bem como a geração dos gráficos, foi realizada no *software* MATLAB R2014b.

### 3.3.3.2 Avaliação do ortomosaico e MDS quanto ao PEC

Após a geração do ortomosaico e do modelo digital de superfície a partir das imagens termiais obtidas durante o sobrevoo com VANT, procedeu-se à análise de exatidão posicional dos produtos gerados. Assim, a exatidão do ortomosaico e do MDS foi verificada com base nos pontos de verificação extraídos dos produtos de referência de acordo com o PEC-PCD.

O método escolhido para avaliar os produtos de acordo com PEC-PCD, mostrado na Figura 3.22, foi uma combinação dos procedimentos realizados por Brito (1987), Tommaselli et al. (1988) e Galo e Camargo (1994), além dos conceitos apresentados pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ASPRS*) (ASPRS, 2014).

Segundo Galo e Camargo (1994), a análise estatística da qualidade geométrica de um produto cartográfico é obtida através das análises de precisão e análise de tendência, sendo a última usada para verificar erros sistemáticos. Estas análises são realizadas através de testes de hipóteses sobre a média e o desvio padrão amostral dos resíduos, obtidos pela diferença entre as coordenadas de campo ( $E_c$ ,  $N_c$ ) e na imagem analisada ( $E_i$ ,  $N_i$ ), conforme a Equação 3.3.

$$(\Delta E_j, \Delta N_j) = (E_c - E_i, N_c - N_i) \quad (3.3)$$

Obtém-se, então, a média ( $\overline{\Delta E}$ ,  $\overline{\Delta N}$ ) e desvio padrão ( $S$ ) para cada uma das componentes, leste ( $E$ ) e norte ( $N$ ). Podem-se também obter as estatísticas, usando a resultante planimétrica a partir da Equação 3.4:

$$\Delta R = \sqrt{(E_c - E_i)^2 + (N_c - N_i)^2} \quad (3.4)$$

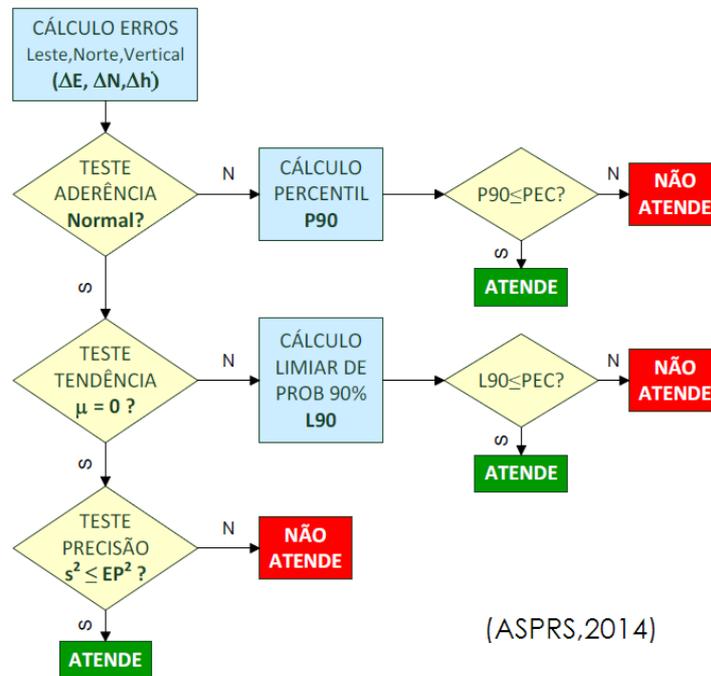
Também foram analisados os erros da componente vertical, obtida por meio da diferença entre a altitude medida em campo ( $h_c$ ) e na imagem ( $h_i$ ).

$$\Delta h_j = (h_c - h_i) \quad (3.5)$$

Com as estatísticas amostrais das componentes: leste, norte, planimétrica e vertical, foram realizados testes específicos para a avaliação de aderência normal, tendência e precisão, seguindo o organograma demonstrado na Figura 3.22.

A análise de normalidade foi realizada no *software* Matlab R2014b, submetendo o conjunto de amostras a um teste de aderência ao modelo de distribuição normal. Esta verificação foi realizada utilizando o teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov no nível de significância de 5%.

Figura 3.22- Organograma da metodologia de avaliação do PEC-PCD.



Fonte: Nogueira et al. (2017), com base em ASPRS (2014).

Caso a distribuição não tenha aderência à normal, realiza-se o cálculo de percentil, e o resultado é analisado em relação ao PEC-PCD. Se for estatisticamente menor ou igual ao padrão, atende ao PEC-PCD, e sendo maior, não atende. Essa comparação estatística foi realizada usando o teste estatístico *t-Student* no nível de significância ( $\alpha$ ) de 1%.

Se a distribuição amostral tiver aderência à normal, procede-se ao teste de tendência. Para tanto, utiliza-se o teste *t-Student*, observando um intervalo de confiança  $(1 - \alpha)$  igual a 99% ( $\alpha = 0,01$ ). A partir do número de pontos coletados, obtém-se um valor limite  $t_{n-1, \alpha/2}$  tabelado. Dessa forma, se o valor absoluto do teste *t* calculado for menor que o valor do teste *t* tabelado (Equação 3.6) para as duas componentes (norte e este), ou somente o componente altimétrico e/ou a resultante planimétrica, a imagem estará livre de erros sistemáticos nas suas coordenadas.

$$|t_{cal}| < t_{n-1, \alpha/2} \quad (3.6)$$

O teste *t* de *Student* é calculado obedecendo às seguintes hipóteses e fórmulas (Equação 3.7):

Para a componente da coordenada X:

H<sub>0</sub>: Se  $\overline{\Delta X} = 0$ , então X não é tendencioso;

H<sub>1</sub>: Se  $\overline{\Delta X} \neq 0$ , então X é tendencioso;

$$t_{calc\ x} = \frac{\overline{\Delta X} \cdot \sqrt{n}}{S_X} \quad (3.7)$$

Caso a hipótese H<sub>0</sub> seja aceita, admite-se que o conjunto amostral não apresenta tendência e realiza-se o teste de precisão.

Se H<sub>0</sub> for rejeitada, o limiar de probabilidade de 90% é calculado, e o resultado é analisado em relação ao PEC-PCD. Se for estatisticamente menor ou igual ao padrão, atende ao PEC-PCD. Do contrário, não atende.

Se o conjunto amostral não apresentar tendências, executa-se o teste de precisão. Para isso, utiliza-se o teste Qui-quadrado, que obedece aos valores do Erro Padrão (EP) estabelecido no pelo PEC-PCD, para cada classe (vide Tabelas 2.2 e 2.3).

Para calcular o Erro Padrão ( $\sigma$ ) de cada componente, utiliza-se a Equação 3.8, e para o erro padrão altimétrico e planimétrico, a Equação 3.9, mais simplificada:

$$\sigma_N = \sigma_E = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (3.8)$$

$$\sigma_{Planimétrico} = \sigma_{Altimétrico} = EP \quad (3.9)$$

A imagem analisada atenderá à precisão (classe A, B, C ou D) se o valor do teste Qui-quadrado calculado ( $X_N^2, X_E^2$  e  $X_h^2$ ) for menor que o teste Qui-quadrado tabelado ( $X_{n-1}^2, \alpha$ ) (Equação 3.10) para as duas componentes (norte e este), ou somente o componente altimétrico e/ou a resultante planimétrica.

$$X_j^2 < X_{n-1}^2, \alpha \quad (3.10)$$

As hipóteses para o teste do Qui-quadrado testam se a variância dos resíduos (amostra) é igual à variância estabelecida pelo PEC-PCD. As hipóteses e fórmulas para o teste Qui-quadrado são as seguintes:

Para a componente da coordenada X:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_x^2 &= \sigma_x^2; \\ H_1: \sigma_x^2 &> \sigma_x^2; \end{aligned}$$

$$X_X^2 = \frac{(n-1) \cdot S_X^2}{\sigma_X^2} \quad (3.11)$$

Portanto, para uma determinada escala, a imagem será classificada como classe A, B, C, D ou 'nula' em função dos resultados obtidos nos testes de precisão.



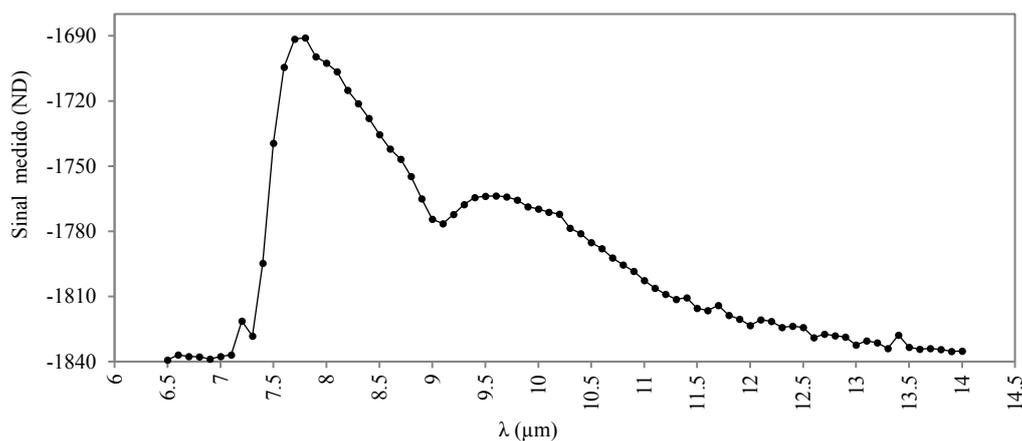
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização Espectral

Conforme metodologia descrita na Seção 3.2.1, os experimentos de caracterização espectral foram realizados separadamente, para os Sensores A e sensor B. No entanto, para efeito de comparação, os resultados das caracterizações serão apresentados em conjunto.

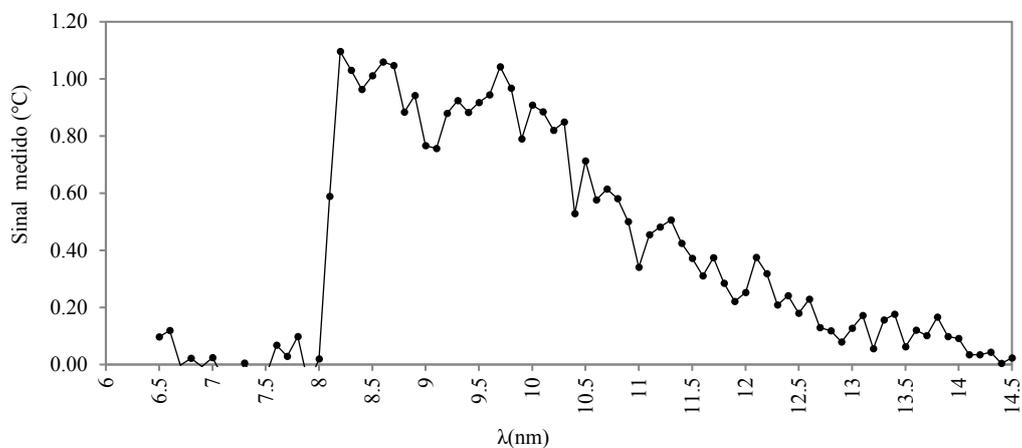
O sinal dos sensores a serem caracterizados,  $S_{sens A}(\lambda)$  e  $S_{sens B}(\lambda)$ , para cada comprimento de onda medido, foi calculado pela diferença de temperatura entre as imagens obtidas com o *chopper* aberto e fechado, conforme Figuras 4.1 e 4.2.

Figura 4.1 – Sinal medido pelo Sensor A.



Fonte: a própria autora.

Figura 4.2 – Sinal medido pelo Sensor B.

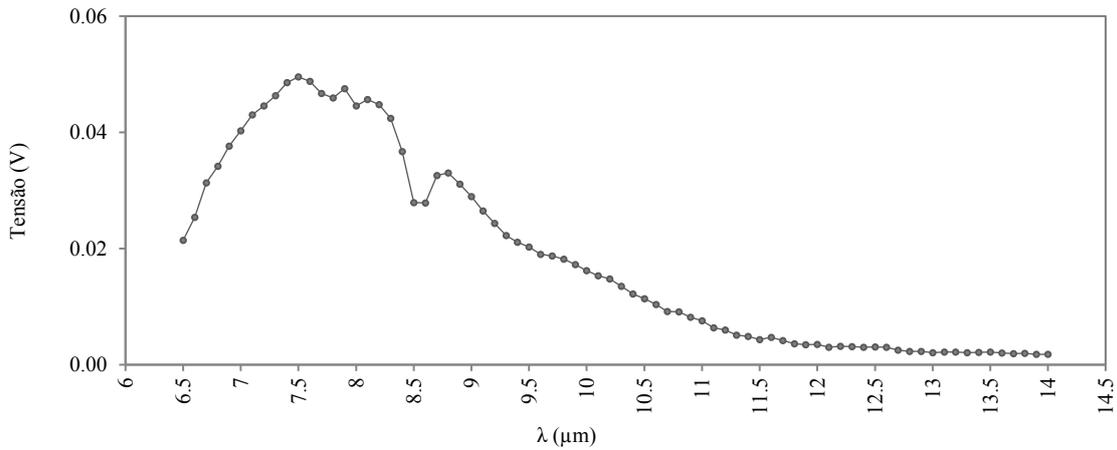


Fonte: a própria autora.

Para ambos os sensores, a grandeza utilizada para quantificar a radiação medida foi a temperatura, obtida em graus celsius. No entanto, para o Sensor A, através da equação de conversão disponibilizada pelo fabricante, foi possível fazer a conversão dos valores para ND.

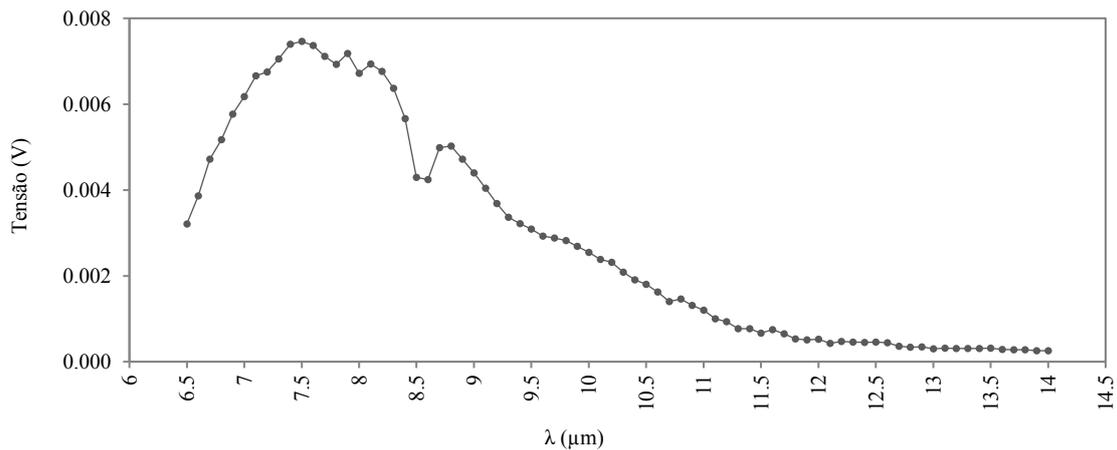
O sinal do sensor de referência (Figura 3.6-c) foi obtido automaticamente por um sistema de aquisição de dados, conforme Figuras 4.3 e 4.4.

Figura 4.3 - Curva de resposta de tensão obtida com o detector de referência Judson/LARAC (Experimento com o Sensor A).



Fonte: a própria autora.

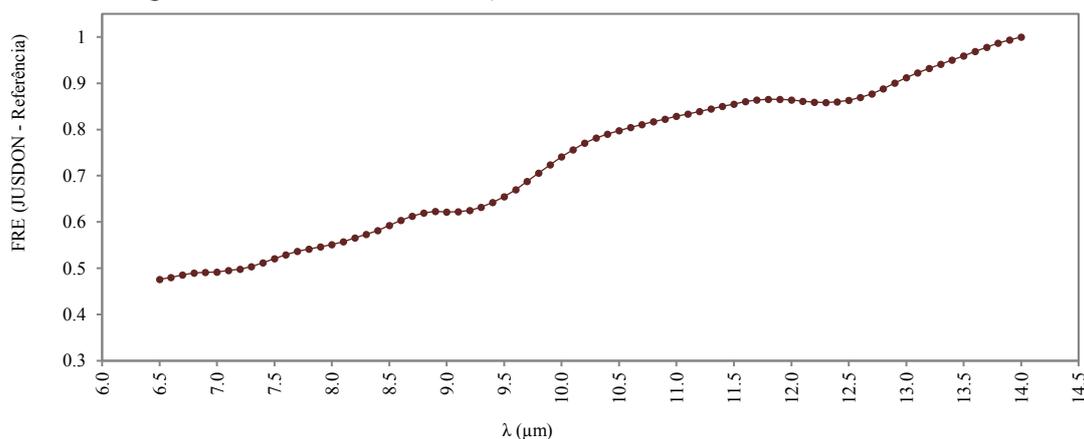
Figura 4.4 - Curva de resposta de tensão obtida com o detector de referência Judson/LARAC (Experimento com o Sensor B).



Fonte: a própria autora.

A curva de resposta relativa do detector de referência utilizado, disponibilizada pelo fabricante, está representada na Figura 4.5. Assim, uma vez que a FRE do sensor de referência é conhecida, a FRE do sensor a ser caracterizado pôde ser calculada utilizando a Equação 2.13.

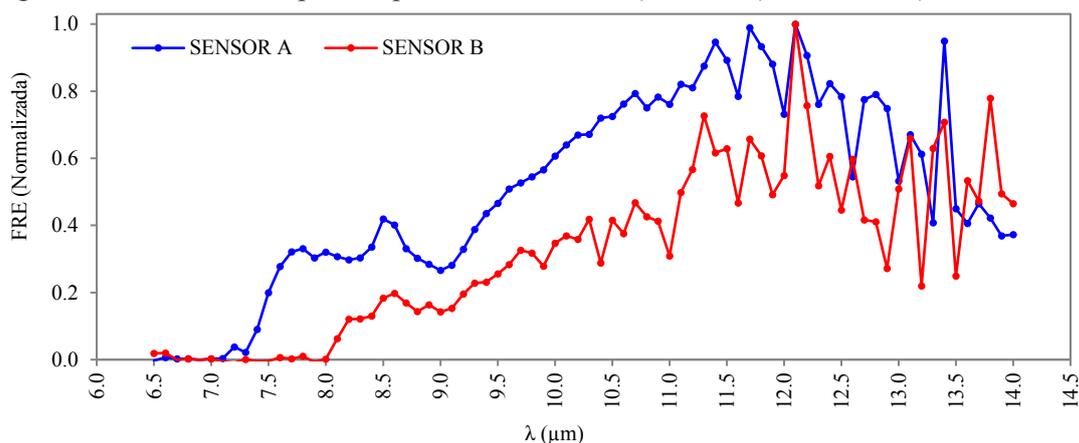
Figura 4.5 - Curva da Função de Resposta Espectral do detector de referência Judson, para a região de interesse de 6,5 a 14  $\mu\text{m}$ .



Fonte: JUDSON TECHNOLOGIES LLC (2002).

As curvas da resposta espectral dos Sensores A e B obtidas estão representadas na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Curvas de resposta espectral do Sensor A (linha azul) e Sensor B (linha vermelha).



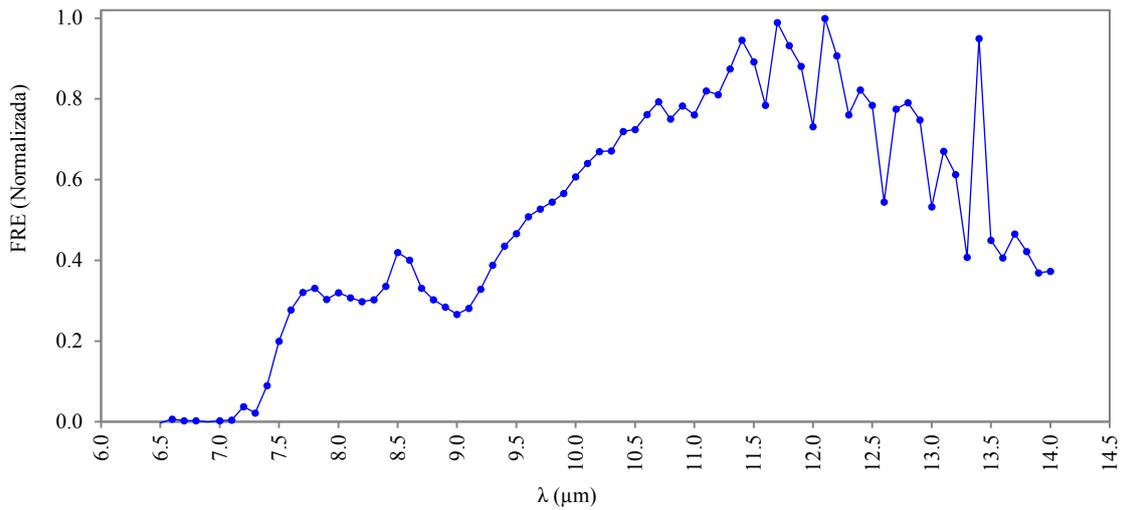
Fonte: a própria autora.

De acordo com as especificações dos fabricantes (Tabela 3.1), os dois sensores caracterizados operam na faixa espectral de 7,5 a 13,0  $\mu\text{m}$ . Da análise laboratorial foi possível observar a real resposta dos sensores nos comprimentos de onda analisados. Constatou-se que o Sensor A apresenta sensibilidade a partir de 7,4  $\mu\text{m}$ , enquanto o Sensor B passa a detectar o fluxo incidente a partir de 8,1  $\mu\text{m}$ . Ambos apresentam um pico em 8,5  $\mu\text{m}$ , depois decrescem até os 9  $\mu\text{m}$  e passam a apresentar, novamente, um aumento suavizado a partir deste comprimento de onda. No Sensor A, este aumento segue suave até os 10,8  $\mu\text{m}$ , quando então se observam ruídos. O Sensor B apresenta ruídos a partir dos 10  $\mu\text{m}$ . Em ambos os sensores, o ruído permanece até os 14  $\mu\text{m}$ , o maior comprimento de onda medido. Este comportamento pode estar relacionado à

presença de pequenas zonas de absorção de H<sub>2</sub>O a partir dos 11 μm e de uma larga faixa de absorção de CO<sub>2</sub> que se inicia aos 13 μm, estendendo-se até próximo a 17 μm. Também se observa que a máxima sensibilidade dos dois sensores se situa em 12,1 μm.

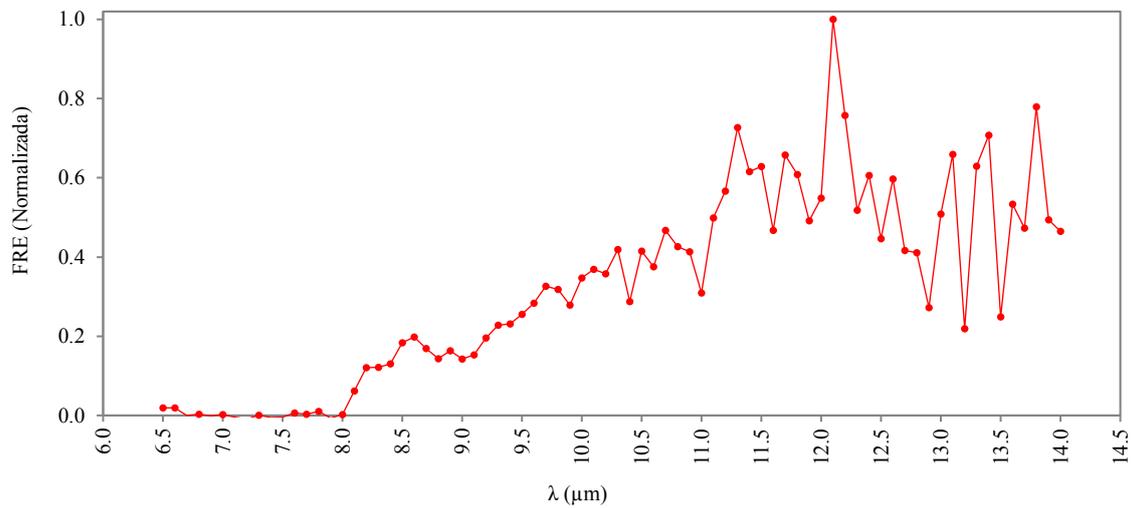
As curvas de função da resposta espectral dos Sensores A e B estão representadas separadamente nas Figuras 4.7 e 4.8.

Figura 4.7 - Curva da Função de Resposta Espectral do sensor A.



Fonte: a própria autora.

Figura 4.8 - Curva da Função de Resposta Espectral do sensor B.



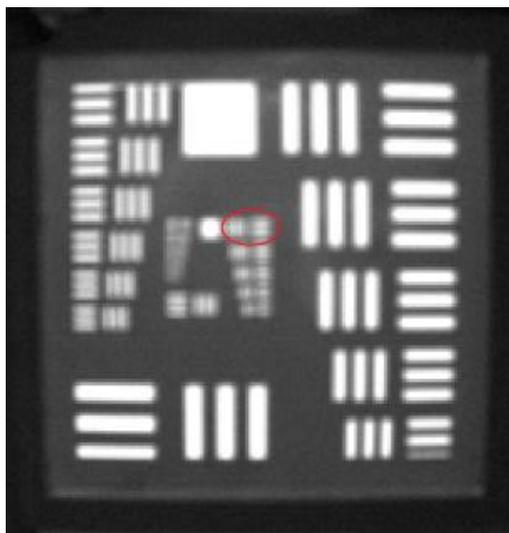
Fonte: a própria autora.

## 4.2 Caracterização Espacial

Através da Equação 2.16 (descrita na Seção 2.2.5.1), calcularam-se os valores de contraste relativo para cada um dos pares de linhas apresentados na Tabela 3.2, obtendo-se assim a função de transferência de contraste, CTF, para cada um dos sensores nas temperaturas ajustadas.

A partir das medições realizadas pelo Sensor A do alvo USAF 1951 sobre o Corpo Negro de área extensa, com diferentes valores da temperatura termodinâmica ajustados (25°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C e 80°C), ver Figura 4.9, o tamanho do *pixel* foi calculado utilizando o número total de *pixels* (148), que compreende a imagem do alvo de 0,3035 m (tamanho real) a uma distância de 0,75 m do sensor. O tamanho efetivo do *pixel* calculado foi de 0,002050 m, e a partir deste calculou-se a frequência de Nyquist para a caracterização do Sensor A, sendo esta de 244 ciclos/m.

Figura 4.9 - Imagem obtida com o Sensor A do alvo USAF 1951, com o Corpo Negro ajustado para uma temperatura termodinâmica de 50 °C. Destaque para o 14° elemento.

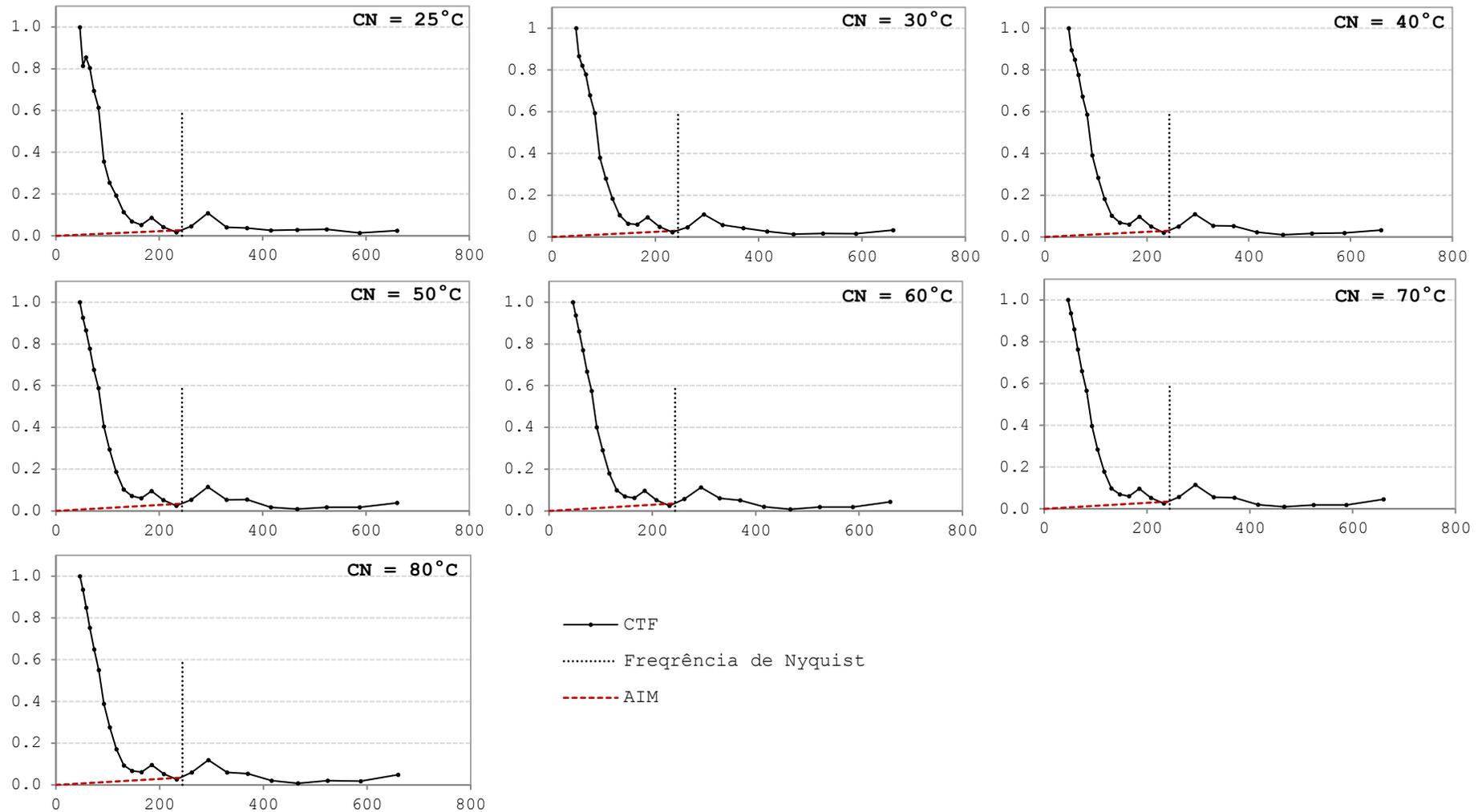


Fonte: a própria autora.

Na Figura 4.10, são apresentadas as curvas de CTF obtidas das medições realizadas. Observa-se que todos os elementos após o 15° ficaram abaixo do limite da resolução do sensor (frequência de Nyquist), e o 15° elemento foi cortado no alvo por falta de contraste, estando abaixo do menor valor de modulação detectável pelo sistema, isto é, o limiar denominado AIM.

Assim, mesmo com a variação de temperatura termodinâmica do CN, em todos os casos, o 14º elemento foi o último resolvido dentro da limitação de resolução do sistema e com contraste suficiente (Figura 4.9). Neste elemento, cada linha contém aproximadamente 2,4 mm de largura, e como a distância da câmera para o alvo era de 0,75 m, cada *pixel* da matriz do sensor fornece um campo de visada de 0,367º (ou 6,4 mrad).

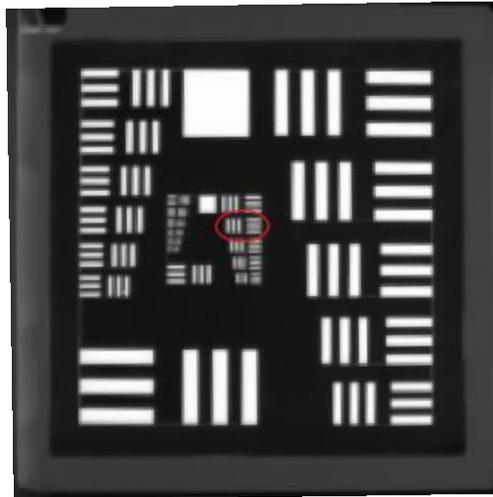
Figura 4.10 - Funções de Transferência de Contraste obtidas pelo Sensor A em temperaturas de 25 a 80°C.



Fonte: a própria autora.

No Sensor B, ver Figura 4.11, o número total de *pixels* que compreendia a imagem do alvo é 156, a uma distância de 1,57 m da câmera e sendo o valor do tamanho efetivo do *pixel* de 0,001945 m, assim, calculou-se que a frequência de Nyquist para o Sensor B é de 257 ciclos/m.

Figura 4.11 - Imagem obtida com o Sensor B do alvo USAF 1951, com o Corpo Negro ajustado para uma temperatura termodinâmica de 50 °C. Destaque para o 15° elemento.



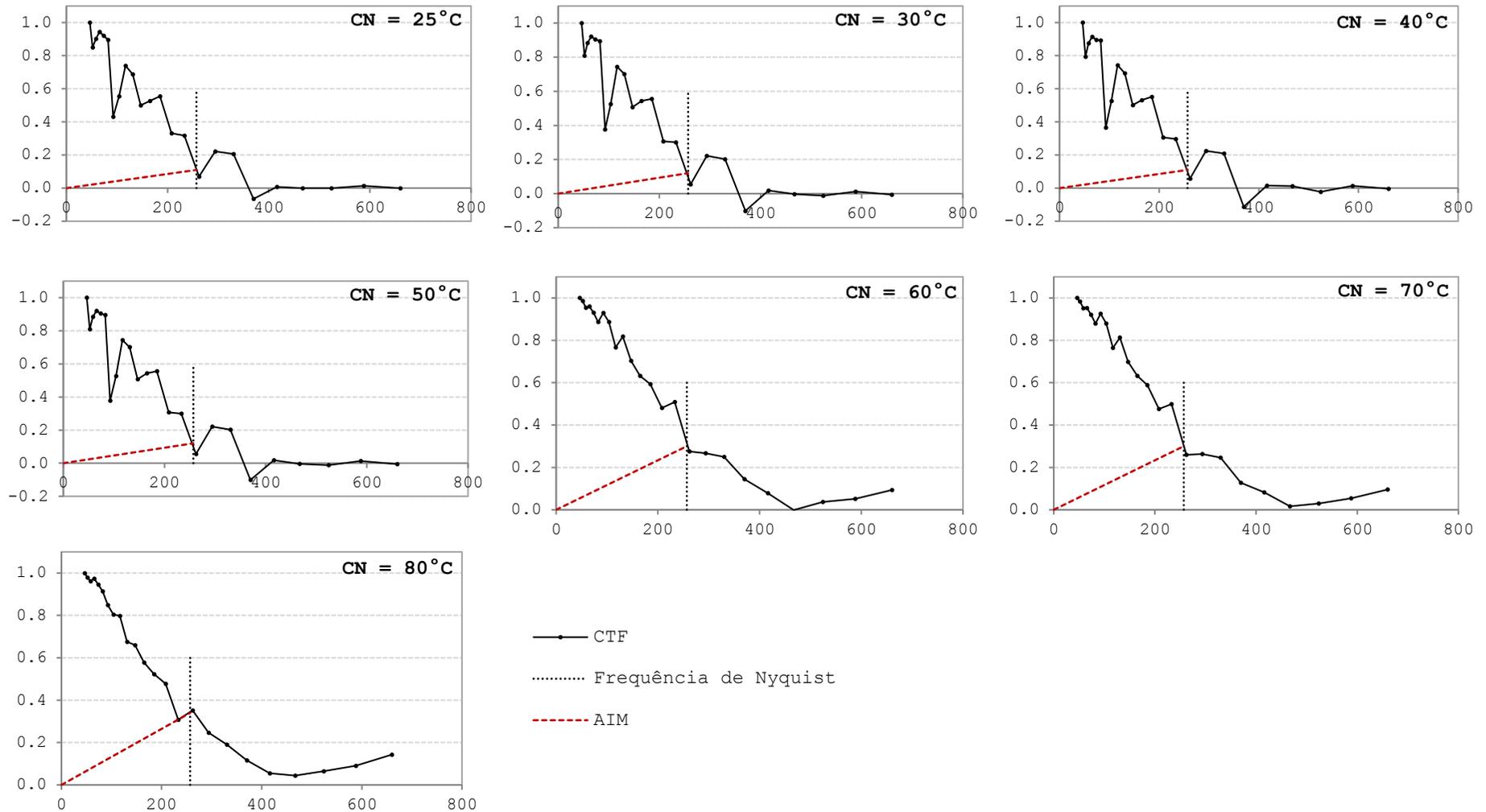
Fonte: a própria autora.

Os gráficos apresentados na Figura 4.12 apresentam as curvas de CTF obtidas a partir de medidas realizadas pelo sensor B do alvo USAF 1951 sobre o corpo negro com diferentes valores de temperatura termodinâmica ajustados (25°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C e 80°C).

Observa-se que todos os elementos após o 15° ficaram abaixo do limite da resolução do sensor (frequência de Nyquist). Com relação ao limite estabelecido pelo contraste, que é indicado pelos elementos abaixo do menor valor de modulação detectável pelo sistema, isto é, o limiar denominado de AIM (*Aerial Image Modulation*), apenas quando o CN foi ajustado para a temperatura termodinâmica de 80°C, observou-se que o elemento 15° foi cortado, sendo o 14° o último resolvido pelo sensor. Para as demais temperaturas, o último elemento resolvido foi o 15° (Figura 4.11).

Neste elemento, cada linha contém aproximadamente 2,15 mm de largura, e como a distância da câmera para o alvo era de 1,57 m, cada *pixel* da matriz do sensor fornece um campo de visada de 0,157° (2,74 mrad).

Figura 4.12 - Funções de Transferência de Contraste obtidas pelo Sensor B em temperaturas de 25 a 80°C.

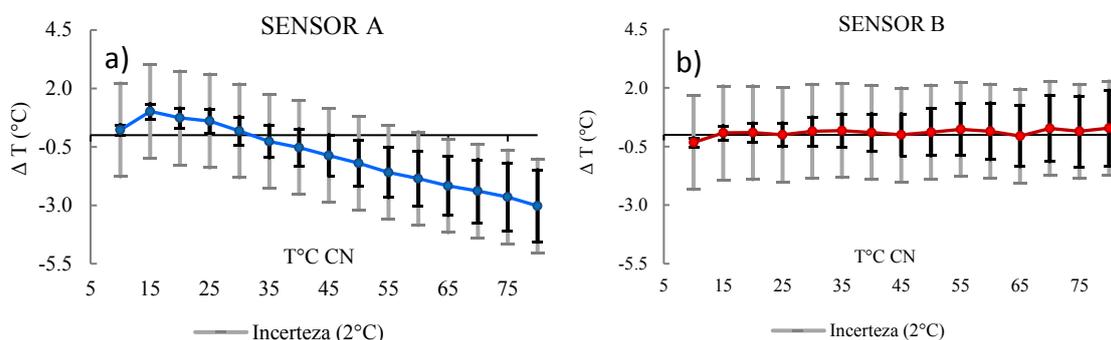


Fonte: a própria autora.

### 4.3 Caracterização radiométrica

A partir dos valores de radiância, temperatura radiante e ND medidos por cada um dos sensores e dos procedimentos descritos na Seção 3.2.3, foi possível analisar as diferenças entre valores medidos e as temperaturas termodinâmica do CN.

Figura 4.13 - a) Diferença entre valores de temperatura ajustados no CN e medidos pelo Sensor A; b) Diferença entre valores de temperatura ajustados no CN e medidos pelo Sensor B.



Fonte: a própria autora.

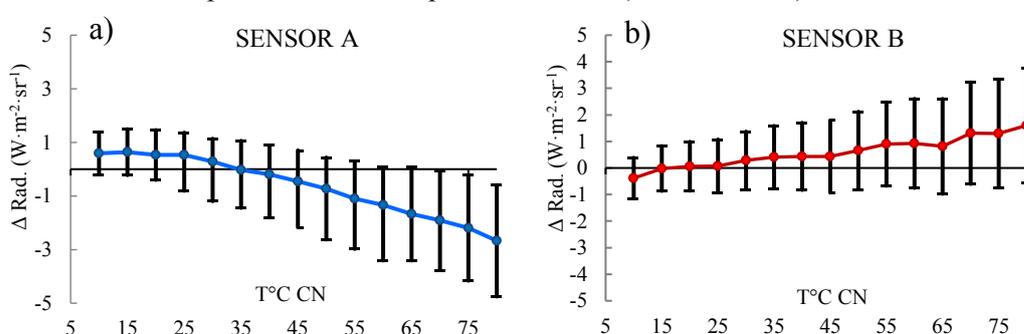
Ao se analisar as diferenças de temperatura (vide Figura 4.13), observa-se que aquelas obtidas para o Sensor A foram maiores que as diferenças do Sensor B. No que se refere ao sensor A, apenas entre 30 °C e 45 °C há diferenças dentro da incerteza de  $\pm 2\%$ . Para as temperaturas de 65 °C e superiores, as diferenças do Sensor A são maiores que aquelas especificadas pelo fabricante de  $\pm 2\%$  ou  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , vide Tabela 3.1. O Sensor B apresenta variações da ordem de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , sendo que apenas quando o CN foi ajustado à 10 °C, houve diferença superior a 2% do valor medido. Todas as diferenças de temperatura oriundas das observações do Sensor B ficaram dentro da incerteza especificada de  $2^{\circ}\text{C}$ . Além disso, vale ressaltar o comportamento sistemático da diferença, em módulo, obtida com o Sensor A, que se tornam maiores com o aumento da temperatura termodinâmica do Corpo Negro. No Sensor B, este efeito não foi observado, sendo que a diferença se manteve sem grande variação.

Ao analisarmos as medições obtidas pelos sensores quando o Corpo Negro foi ajustado com temperatura termodinâmica de 40 °C percebe-se que o Sensor A apresentou diferença em relação ao valor ajustado superior ao Sensor B, sendo de  $-0,5^{\circ}\text{C}$  para o

primeiro e, 0,1 °C para o segundo. Entre eles observa-se uma diferença de 0,6 °C. A incerteza das medições realizadas pelo Sensor A foi crescente conforme se aumentou a temperatura termodinâmica do Corpo Negro, sendo que para a temperatura de 80 °C, máximo valor ajustado, as medições realizadas com o Sensor A apresentou diferença de 3,0 °C e, com o Sensor B, 0,3°C. Entre as medições realizadas pelos Sensores para esta mesma temperatura observa-se a discrepância de 3,3 °C.

Para contornar as incertezas relativas à emissividade do CN (0,98), na segunda análise, a radiância emitida pelo CN e a radiância medida pelos sensores foram analisadas permitindo verificar o comportamento radiométrico de ambos sensores (Figura 4.14). Esta foi realizada a partir da diferença entre os valores de radiância calculadas com base nas temperaturas radiantes medidas pelos dois sensores e a radiância do Corpo Negro, corrigida pela emissividade do CN e adicionada à radiância do ambiente refletida no CN. As incertezas envolvidas nesta análise referem-se a 2% do valor da radiância, conforme especificação dos fabricantes.

Figura 4.14 - Diferença entre valores de radiância do CN e radiância calculada a partir das temperaturas medidas pelos sensores: a) Sensor A e b) Sensor B.



Fonte: a própria autora.

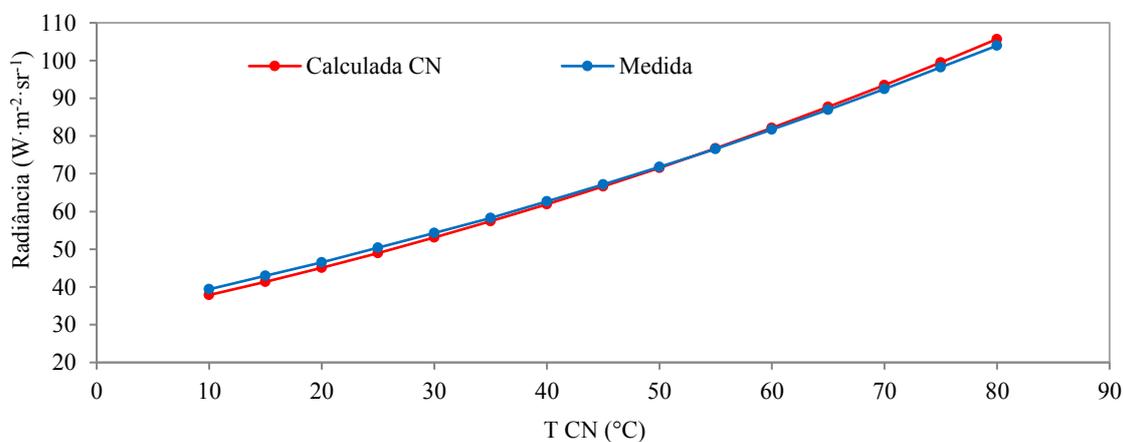
O Sensor A apresentou diferenças da ordem de  $\pm 0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ , quando o CN foi ajustado com temperatura termodinâmica de 10 a 45 °C, e a partir deste limite, os valores medidos foram sempre inferiores à radiância que chegou ao sensor e, conforme o aumento da temperatura termodinâmica do CN, essa diferença ficou ainda mais expressiva. Com a temperatura termodinâmica do CN ajustada ao valor igual ou maior

que 70 °C, observa-se que a diferença foi superior a 2%, e portanto, superiores à incerteza declarada pelo fabricante. Vale ressaltar que neste experimento só foram consideradas as incertezas relativas dos Sensores A e B.

Das variações observadas entre os valores da radiância medida pelo Sensor B e aquela que chegou até ele, 87% das diferenças foram inferiores às observadas no experimento do Sensor A. Apenas para as temperaturas de 35 °C e 40 °C, as medidas realizadas pelo Sensor A foram mais precisas. Todas as medidas realizadas pelo Sensor B ficaram dentro das incertezas especificadas.

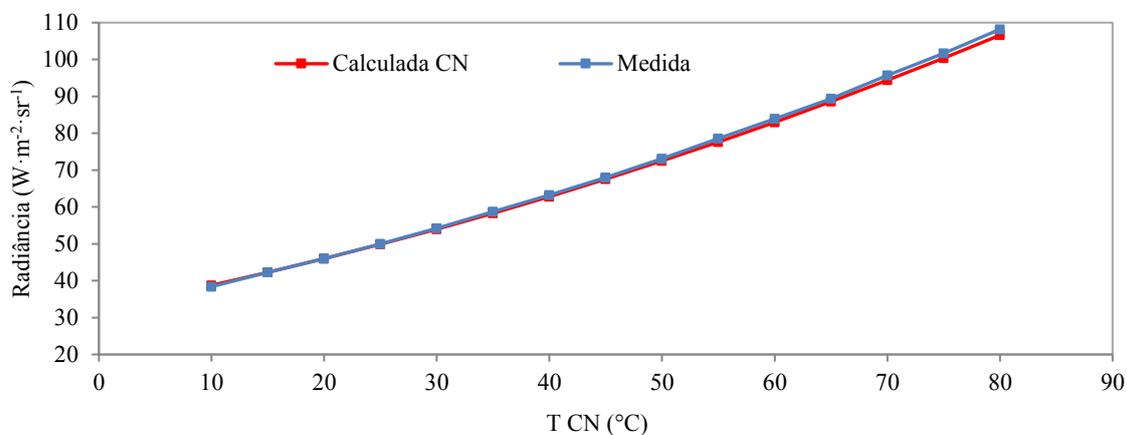
A comparação das curvas de radiância, calculadas a partir da temperatura termodinâmica ajustada no Corpo Negro (com as devidas correções mencionadas acima) e a partir da temperatura radiante medida, para os Sensores, A e B, revela que estas apresentaram comportamento muito similar e estão ilustradas nas Figuras 4.15 e 4.16, respectivamente.

Figura 4.15 - Radiância, calculada a partir da temperatura medida pelo Sensor A (7,5 – 13  $\mu\text{m}$ ) (linha azul) e calculada teoricamente a partir da temperatura do CN (linha vermelha) x temperatura ajustada no CN.



Fonte: a própria autora.

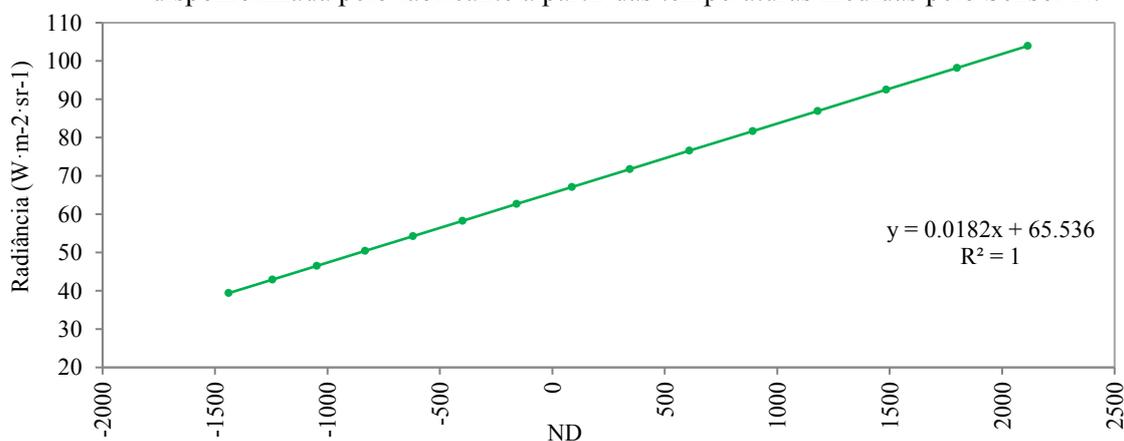
Figura 4.16 - Radiância, calculada a partir da temperatura medida pelo Sensor B (7,5 – 13  $\mu\text{m}$ ) (linha azul) e calculada teoricamente a partir da temperatura do CN (linha vermelha) x temperatura ajustada no CN.



Fonte: a própria autora.

Da relação obtida entre os valores de radiância calculados a partir dos valores de temperaturas radiante medidos pelo Sensor A e os números digitais, calculados através da equação de ajuste (Figura 3.13), obteve-se a seguinte curva (Figura 4.17):

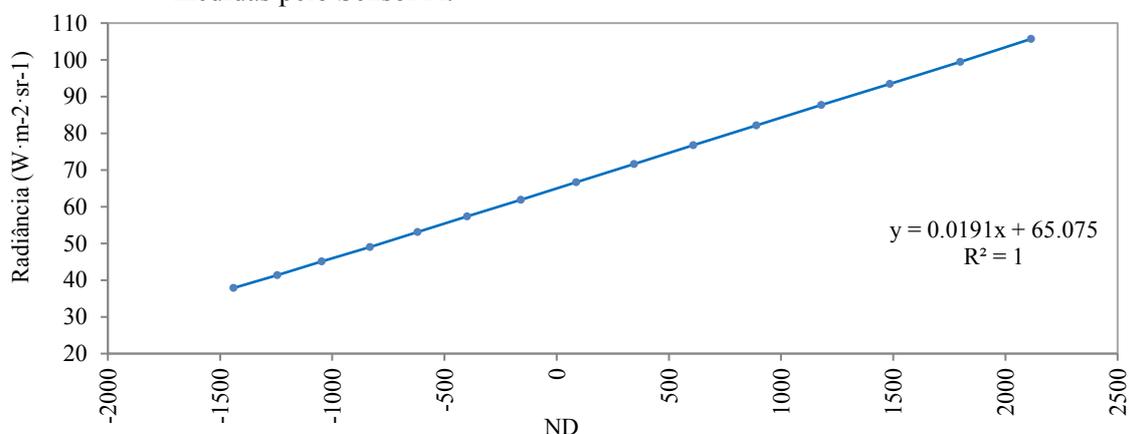
Figura 4.17 - Radiância calculada a partir da temperatura medida pelo sensor x ND pela relação disponibilizada pelo fabricante a partir das temperaturas medidas pelo Sensor A.



Fonte: a própria autora.

Se corrigida, a curva de conversão de ND para radiância poderia ser expressa pela equação linear apresentada na Figura 4.18.

Figura 4.18 - Relação entre a radiância teórica calculada a partir da temperatura do CN e NDs estimados pela relação disponibilizada pelo fabricante a partir das temperaturas medidas pelo Sensor A.



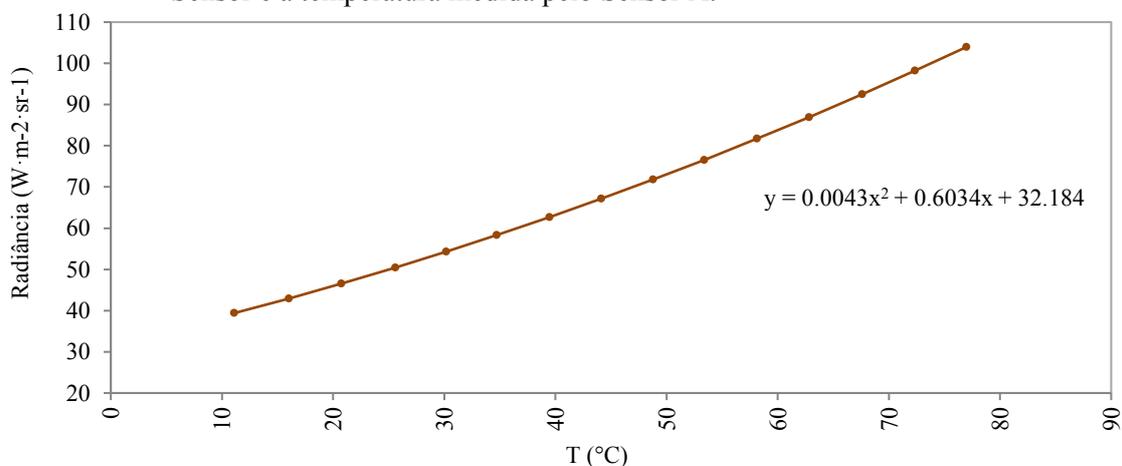
Fonte: a própria autora.

Esta foi obtida através da relação entre os ND obtidos a partir dos valores de temperatura radiante medidos pelo sensor e a radiância teórica calculada a partir da temperatura termodinâmica ajustada no CN. Importa ressaltar que o CN utilizado possui emissividade de 0,98 e, portanto, após calcular a radiância teórica, foi necessário ponderá-la pela emissividade do CN e adicionar ao seu valor a parcela referente à radiância refletida no corpo negro (0,02), emitida pelo ambiente, este que possuía temperatura do ar de 22,7 °C no instante das medições. Dessa forma, a partir dos valores de ND torna-se possível derivar valores de radiância mais próximos àqueles emitidos pelo corpo negro.

Para o Sensor B, esta análise não foi realizada, pois a função de conversão dos dados em ND não foi disponibilizada pela fabricante.

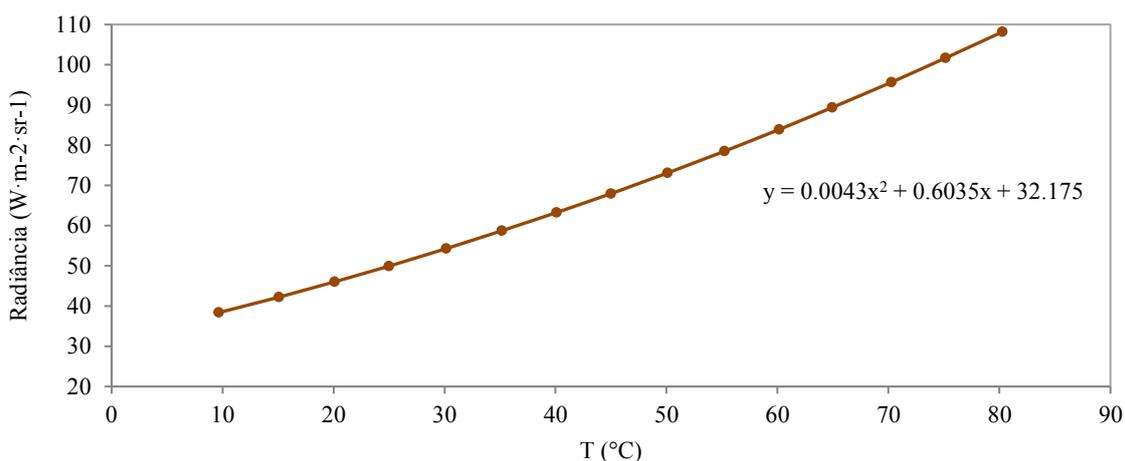
Outra comparação realizada refere-se à radiância calculada a partir dos valores de temperatura radiante medidos pelo sensor e a própria temperatura radiante medida pelo sensor. Esta relação é importante, pois permite observar que esta não apresenta um comportamento linear, sendo que a derivação de uma em relação a outra pode inserir maior resíduo na análise. As curvas obtidas para os dois sensores estão representadas nas Figuras 4.19 e 4.20.

Figura 4.19 - Relação obtida entre a radiância calculada a partir da temperatura medida pelo Sensor e a temperatura medida pelo Sensor A.



Fonte: a própria autora.

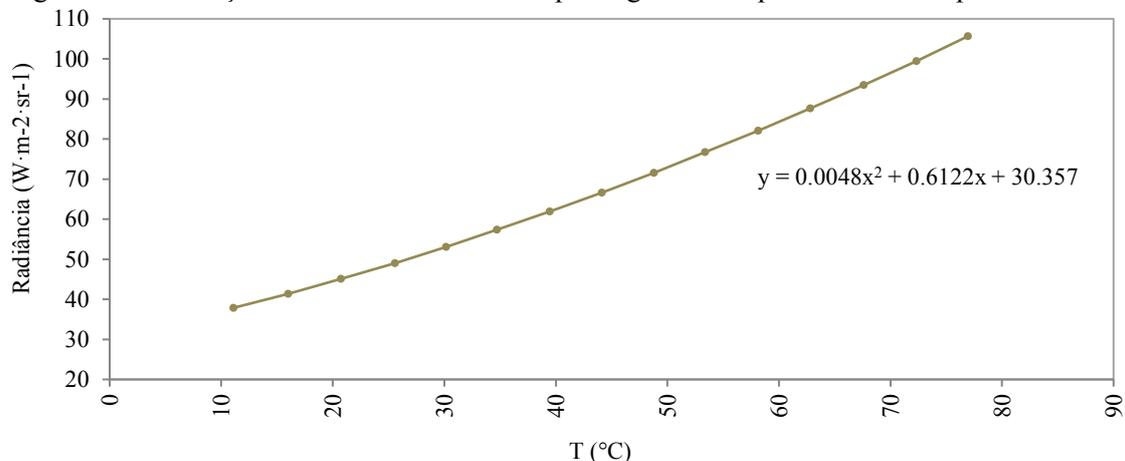
Figura 4.20 - Relação obtida entre a radiância calculada a partir da temperatura medida pelo Sensor e a temperatura medida pelo Sensor B.



Fonte: a própria autora.

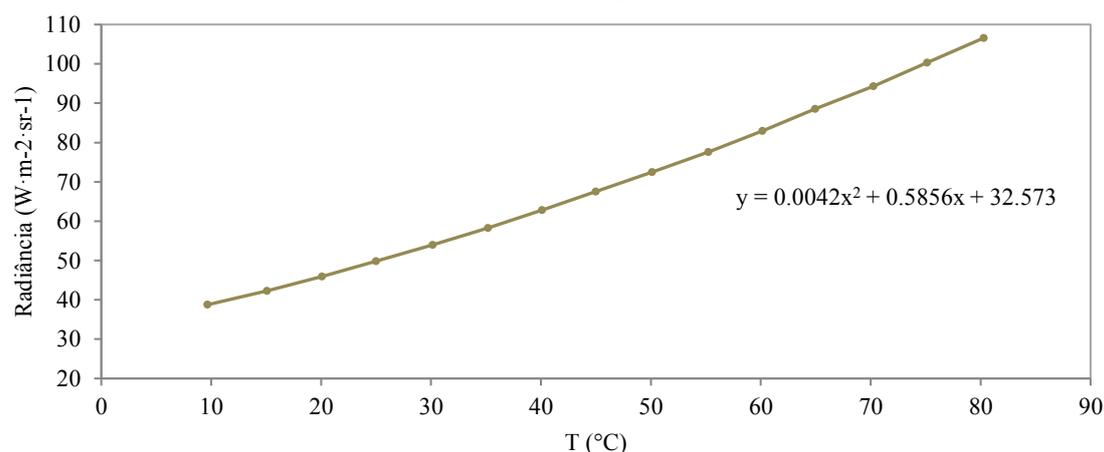
Da mesma forma, nas Figuras 4.21 e 4.22, foram representadas a relação entre a radiância calculada por meio da temperatura termodinâmica do CN (e devidas correções oriundas da sua emissividade) e a temperatura radiante medida pelos Sensores A e B, respectivamente. Esta função descreve a relação de conversão dos dados de temperatura radiante medidos pelo sensor para a radiância do CN e pode ser utilizada na conversão dos dados obtidos por estes sensores. Novamente, não foram observados comportamentos lineares.

Figura 4.21 - Relação entre a radiância do Corpo Negro e a temperatura medida pelo Sensor A.



Fonte: a própria autora.

Figura 4.22 - Relação entre a radiância do corpo negro e a temperatura medida pelo Sensor B.



Fonte: a própria autora.

#### 4.4 Análise radiométrica de campo

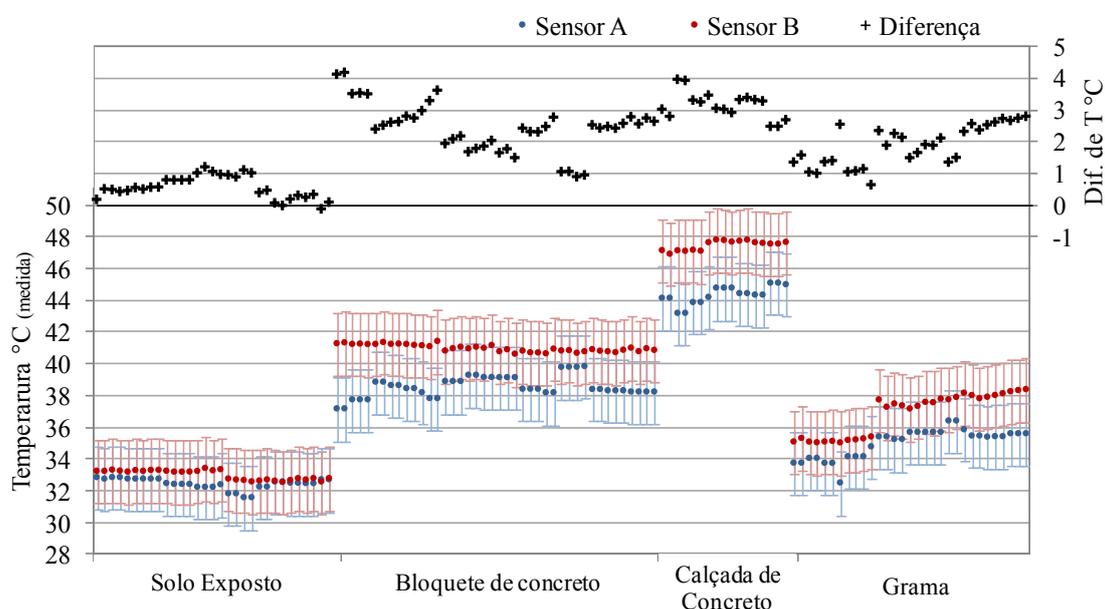
Em campo, quatro alvos com coberturas diferentes, a saber: solo exposto, bloquete de concreto, calçada de concreto e grama, foram medidos pelos dois sensores previamente caracterizados radiometricamente em laboratório. Um dos sensores, a bordo de um VANT, obteve medições/imagens das superfícies a aproximadamente 20 m de altitude, e outro, controlado manualmente, a 1,5 m, sendo este último utilizado como referência

para as análises. Nestas medições, que devido ao consumo da bateria que alimentava o sensor a bordo do VANT, o tempo de aquecimento do sensor A não foi respeitado.

A primeira comparação realizada refere-se aos valores de temperatura aparente fornecidos por cada um dos sensores sem qualquer correção posterior a obtenção dos dados. Os valores fornecidos pelos sensores A (linha azul) e B (linha vermelha) e a diferença entre eles (linha preta) estão representados na Figura 4.23. A escala de valores fornecidos está representada no eixo da esquerda e a diferença observada no eixo da direita. Junto aos valores, nas mesmas respectivas tonalidades, as incertezas declaradas pelos fabricantes de cada um dos sensores estão representadas em barras.

A diferença média observada entre os valores de temperatura fornecidos pelos sensores foi de 1,9 °C, sendo a diferença máxima de 4,2 °C. Em mais de 50% das medidas efetuadas, a diferença entre os valores fornecidos pelos sensores foi superior a  $\pm 2$  °C, incerteza máxima declarada pelos fabricantes, para ao menos 68% das amostras. Vale ressaltar que, se consideradas as incertezas acumuladas dos dois sensores ( $\pm 3,4$  °C e ou  $\pm 3,4\%$ ) as diferenças observadas são aceitáveis para todas as amostras. No entanto, as análises a seguir serão realizadas considerando apenas a incerteza de  $\pm 2$  °C e ou  $\pm 2\%$ , uma vez que um dos sensores foi tomado como referência.

Figura 4.23 – Comparação entre os valores de temperatura aparente medidos pelos sensores A e B.



Fonte: a própria autora.

Com relação aos diferentes alvos observados, o solo exposto foi o que apresentou menor desvio entre os valores medidos pelos diferentes sensores, em média 0,5 °C. As medidas de grama tiveram diferença média de 1,86 °C e máxima de 2,53 °C. Neste alvo, percebe-se um aumento nos valores de temperatura medidos ao longo do tempo. Os alvos de concreto, tanto o bloquete quanto a calçada, foram os que apresentaram maior desvio entre as medidas dos sensores, em média 2,42 °C e 3,14 °C, respectivamente. Nestes alvos, se observaram as maiores diferenças e também maior oscilação nas temperaturas medidas pelo Sensor A. No Sensor B, observa-se menor variação entre os valores medidos para um mesmo alvo.

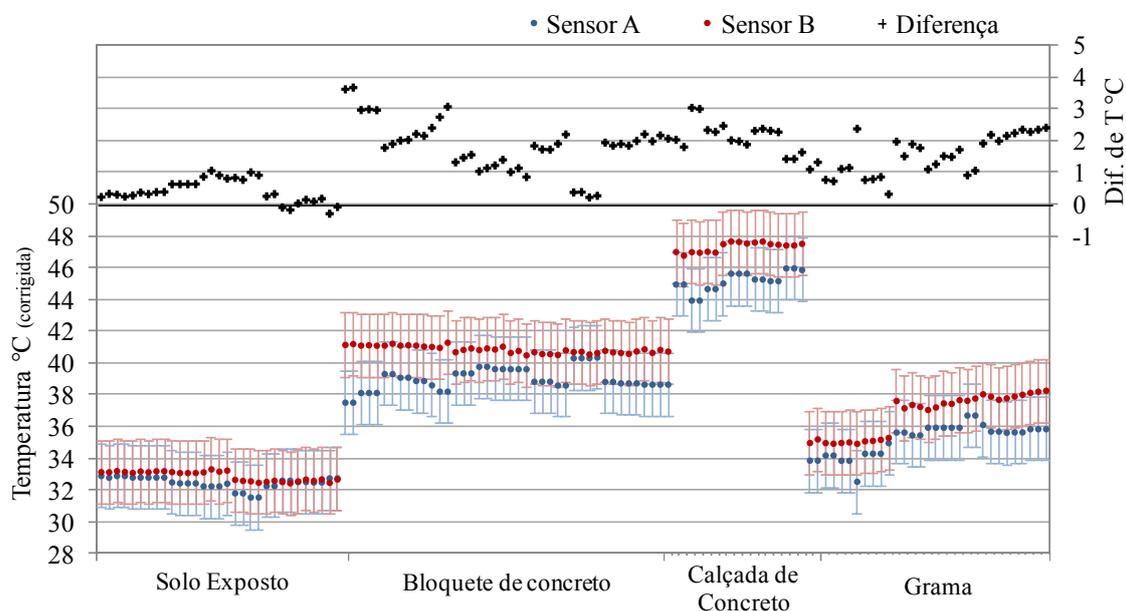
As diferenças de temperatura medidas pelos sensores A e B para os mesmos alvos em campo se mostraram ser superiores a diferença observada em laboratório, quando estes obtiveram medidas do Corpo Negro ajustado nas mesmas temperaturas. Como exemplo, pode-se tomar as medições da calçada de concreto que possuía temperatura próxima a 40 °C, onde a diferença observada foi de aproximadamente 2 °C, enquanto que em laboratório a divergência das medições dos dois sensores para esta temperatura foi, em média, de 0,6 °C.

Sobre a oscilação dos valores medidos pelo Sensor A ao longo do tempo de voo e, maior discrepância entre os valores medidos pelos Sensores em relação os experimentos laboratoriais, acredita-se que, além do possível efeito da camada de ar entre a superfície e o sensor, tais problemas sejam provenientes da própria oscilação da atitude do VANT, onde o sensor encontrava-se embarcado. Isso, porque a partir de uma rajada de vento, por exemplo, o ângulo de visada do sensor pode ter sido alterado e diante disso, o valor medido influenciado.

Desta análise de caracterização radiométrica resultaram as equações de calibração radiométrica para cada um dos sensores que permitiram a correção dos dados medidos em campo. Estes estão apresentados na Figura 4.24. O modo de representação segue o padrão explicado anteriormente.

Após a correção pelas equações de calibração, a diferença média observada entre os valores medidos pelos sensores foi de 1,45 °C, diminuindo 0,5 °C em relação aos valores brutos. A diferença máxima observada foi de 3,7 °C. Com a correção radiométrica aplicada aos valores medidos pelos sensores, e tomando o Sensor B como referência, constatou-se que 69% dos valores medidos pelo Sensor A obtiveram medidas dentro da incerteza de  $\pm 2$  °C.

Figura 4.24 – Comparação entre os valores de temperatura aparente obtidos pelos Sensores A e B após a correção pela equação de calibração radiométrica.

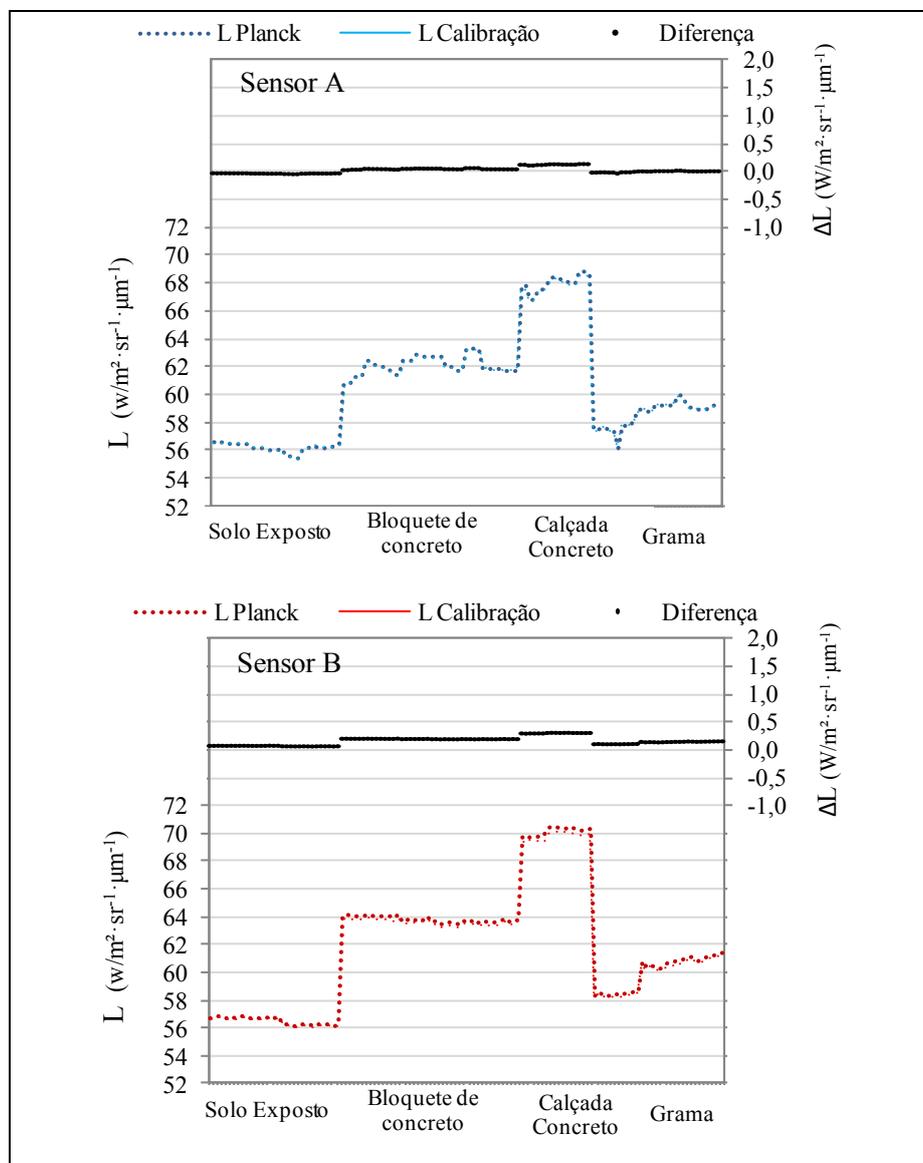


Fonte: a própria autora.

Além da equação de calibração, da caracterização radiométrica também resultou uma equação de conversão dos valores de temperatura aparente medidos pelos sensores para a radiância emitida em função desta temperatura. A fim de verificar a incerteza dos valores obtidos a partir desta conversão, também foram calculados valores de radiância a partir da equação de Planck (Equação 2.1), utilizando valores de temperatura aparente corrigida pelos parâmetros de calibração.

Os valores de radiância obtidos por estes dois métodos foram comparados para cada um dos sensores, sendo que estes e suas respectivas diferenças estão representados na Figura 4.25. A diferença média entre os valores de radiância obtidos pela equação de Planck e pela equação de conversão foi de  $0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$  para as medidas do Sensor A, e  $0,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$  para medidas do Sensor B.

Figura 4.25 – Gráficos de valores de radiância calculados pela equação de Planck e através da equação de calibração a partir das medidas dos Sensores A (azul) e B (vermelho) e suas respectivas diferenças.



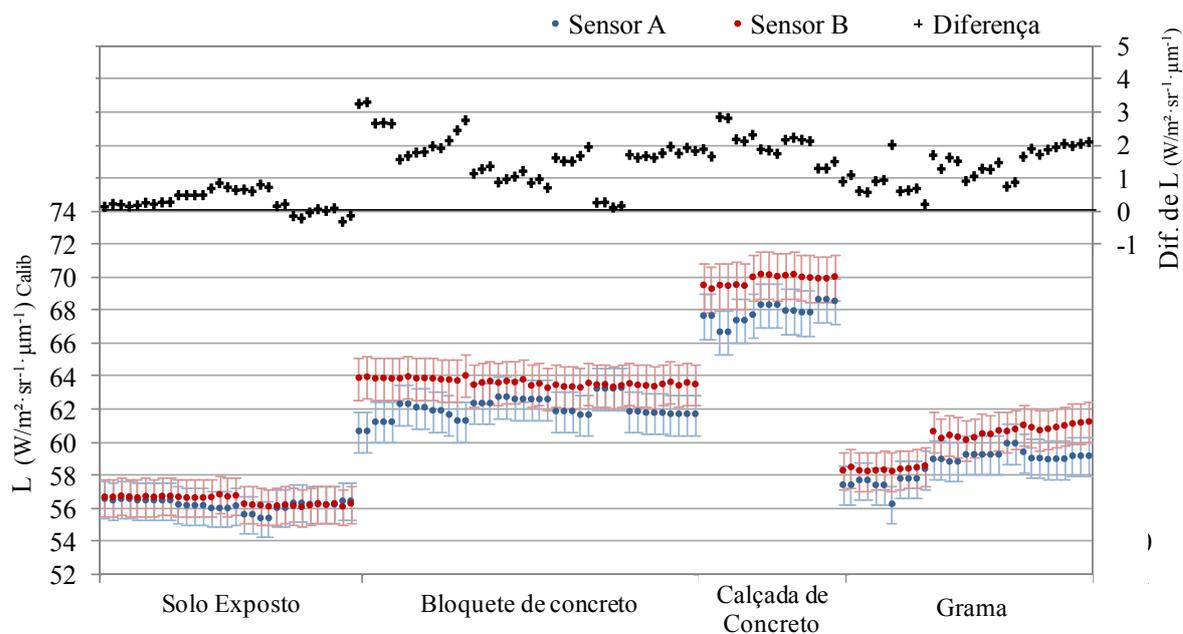
Fonte: a própria autora.

Os valores de radiância obtidos pelos dois métodos foram submetidos ao teste estatístico de Kruskal-Wallis, a fim de avaliar se os diferentes grupos provêm de uma mesma distribuição (hipótese nula) em um nível de significância de 5%. O  $p$ -valor obtido foi de 0,5546, e assim, não se pôde rejeitar  $H_0$ . Assim, adotou-se o método mais simples, a equação de conversão.

A comparação entre os valores de radiância obtidos a partir da equação de conversão está representada na Figura 4.26. Assim como nas figuras apresentadas anteriormente, neste gráfico, estão plotadas as diferenças observadas entre as medidas dos dois sensores e suas respectivas incertezas, que, para valores de radiância, foi referente a  $\pm 2\%$  do valor medido.

Ao observar o comportamento das curvas apresentadas na Figura 4.26, percebe-se semelhança com as curvas referentes aos dados de temperatura corrigidos pela equação de calibração. A diferença média observada entre os valores medidos pelos sensores foi de  $1,23 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ . A diferença máxima observada foi de  $3,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ .

Figura 4.26 – Comparação entre os valores de radiância, calculados pela equação de calibração, a partir dos dados fornecidos pelos sensores A e B.



Fonte: a própria autora.

Com a conversão radiométrica aplicada aos valores de temperatura aparente fornecidos pelos sensores, e tomando o Sensor B como referência, constatou-se que em mais de 50% das medidas efetuadas a diferença entre os valores medidos pelos sensores foi superior a  $\pm 2\%$ , incerteza máxima declarada pelos fabricantes, para ao menos 68% das amostras.

Nesta análise, constata-se que as medidas do Sensor A, quando submetidas à equação de conversão para radiância, apresentam diferenças superiores às incertezas estabelecidas. Uma importante ressalva deve ser feita quanto à análise da incerteza considerando a porcentagem da radiância, visto que como os sensores registram apenas valores de temperatura, as incertezas declaradas pelo fabricante podem não ser adequadas para a análise de outras grandezas físicas.

Com o objetivo de investigar se a diferença apresentada entre os valores medidos pelos sensores pode ter sido influenciada pela distância da aquisição dos dados e, conseqüentemente, da camada atmosférica entre o Sensor A, a bordo do VANT, e os alvos observados na superfície, foram estimados parâmetros atmosféricos através do modelo de transferência radiativa MODTRAN para posterior correção dos dados.

Os parâmetros estimados foram: a transmitância atmosférica ( $\tau$ ), a radiância descendente ( $L_d$ ) e a radiância ascendente ( $L_a$ ). Os valores oriundos do modelo foram ponderados pela FRE do sensor e a radiância descendente multiplicada pela reflectância média dos alvos, esta que é dada por 1 (um) menos a emissividade, conforme derivação apresentada na Seção 2.1.4. Os valores obtidos e utilizados para a correção atmosférica dos dados medidos pelo Sensor A estão representados na Tabela 4.1.

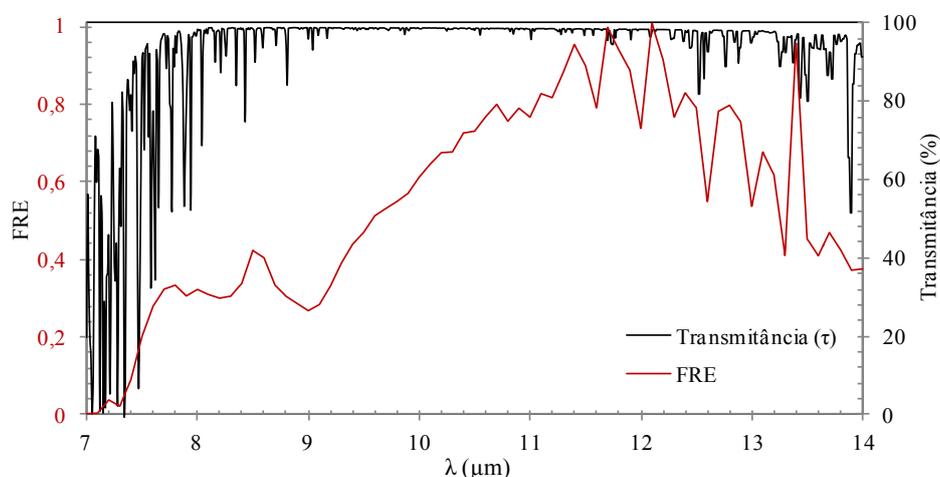
Tabela 4.1 - Parâmetros atmosféricos utilizados na correção.

Parâmetros	Símbolo	Valores obtidos	Unidade
Transmitância atmosférica	$(\tau)$	0,97	-
Radiância Descendente Refletida	$(1-\varepsilon) \cdot L_d$	0,07	W/m <sup>2</sup> ·sr· $\mu$ m
Radiância Ascendente	$(L_a)$	0,003	W/m <sup>2</sup> ·sr· $\mu$ m

Fonte: a própria autora.

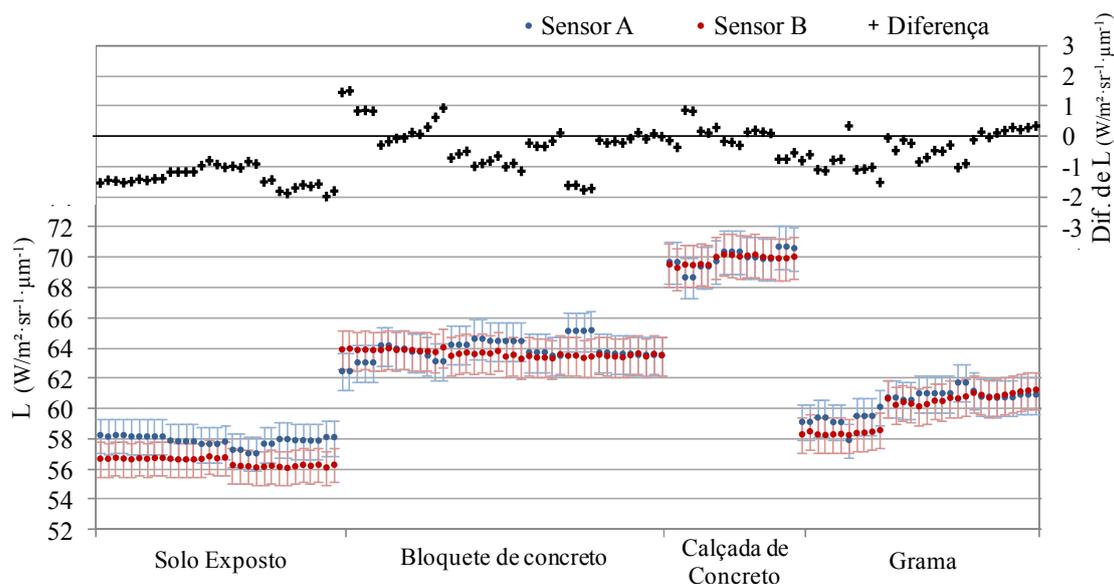
Na Figura 4.27, pode ser observada a transmitância atmosférica juntamente com a FRE do Sensor A, obtida por meio da etapa de caracterização espectral, descrita na Seção 4.1.

Figura 4.27 – Transmitância atmosférica obtida pelo modelo de transferência radiativa e FRE do Sensor A.



Fonte: a própria autora.

Figura 4.28 – Comparação entre os valores de radiância obtidos pelos Sensores A e B após a correção atmosférica.



Fonte: a própria autora.

Na Figura 4.28, estão representados valores de radiância provenientes dos dados obtidos pelo Sensor A, corrigidos pela equação de conversão radiométrica e pelos parâmetros atmosféricos (linha azul), e dos dados obtidos pelo sensor de referência convertidos pela equação de conversão radiométrica (linha vermelha). As incertezas de cada um dos sensores estão plotadas em forma de barras nas mesmas respectivas tonalidades. Na

parte superior do gráfico, a diferença obtida entre os sensores pode ser observada de acordo com os valores representados no eixo do lado direito.

Ao analisar a Figura 4.28, observa-se que, após a correção atmosférica dos dados obtidos a bordo do VANT, as diferenças entre os valores medidos pelo Sensor A em relação ao Sensor B (de referência) diminuiu. A média das diferenças observadas foi de  $-0,57 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$  e a máxima diferença observado foi de  $-2,01 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ .

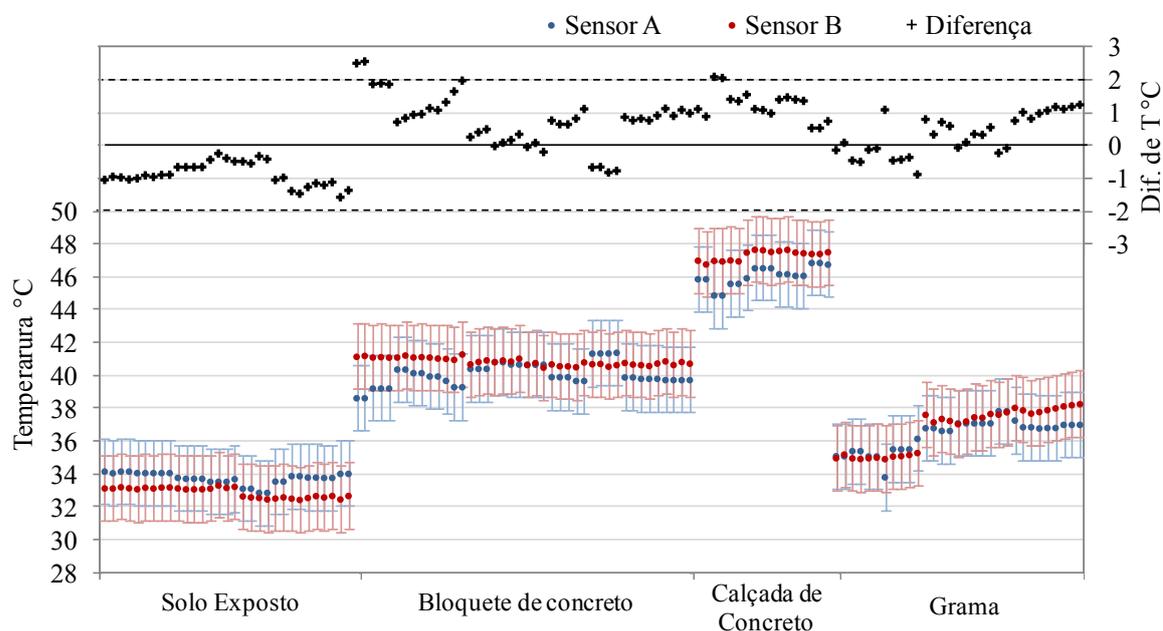
Com relação aos diferentes alvos, observou-se que, com a correção pelos parâmetros atmosféricos, as medidas realizadas no solo exposto, que antes apresentavam as menores diferenças, apresentaram o maior desvio entre as superfícies observadas, sendo em média  $1,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ . As diferenças médias observadas para os alvos de concreto (bloquete e calçada) foram minimizadas, sendo de  $-0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$  e  $-0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ , respectivamente. No entanto, observa-se ainda alguns valores extremos, provavelmente oriundos da oscilação dos valores medidos pelo Sensor A, conforme já anteriormente mencionado. Para a superfície coberta por vegetação gramínea, a diferença média, que era de  $1,27 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ , diminuiu para  $-0,46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ .

Observa-se que, após a correção atmosférica, as diferenças entre os valores de radiância obtidos a partir das medidas realizadas pelos Sensores A e B apresentaram valores próximos a zero, com uma maior quantidade de valores negativos, o que em média diminui a discrepância geral dos dados medidos pelos sensores.

Observou-se que, quando comparadas às medidas de referência, 75% das medidas obtidas pelo Sensor A apresentaram diferenças inferiores a  $\pm 2\%$  do valor medido, incerteza estabelecida para ao menos 68% das amostras. Assim, constata-se que, quando submetidos à correção atmosférica, os valores de radiância oriundos do Sensor A ficaram dentro das incertezas estabelecidas pelo fabricante.

A mesma análise foi estabelecida utilizando valores de temperatura em graus Celsius. Os valores medidos pelo Sensor A, corrigidos pela equação de calibração e pelos parâmetros atmosféricos, estão comparados aos valores medidos pelo Sensor B, corrigidos pelos parâmetros de calibração, na Figura 4.29.

Figura 4.29 – Comparação entre os valores de temperatura obtidos pelos Sensores A e B após a correção atmosférica.



Fonte: a própria autora.

Assim como na análise dos valores de radiância, observando as diferenças de valores de temperatura, percebe-se uma diminuição da discrepância entre os valores medidos pelos dois sensores. Tal diferença, que era, em média, de 1,90 °C para os valores brutos medidos pelos sensores (Figura 4.23) e 1,45 °C, em média, para os valores corrigidos pelos parâmetros de calibração (Figura 4.24), foi minimizada para 0,32 °C, em média, após a correção atmosférica. Observou-se que as diferenças observadas oscilaram em torno de zero, variando de -1,56 a 2,58 °C.

Na parte superior da Figura 4.29, foram destacadas em linhas pontilhadas os limites de 2 e -2 °C, a fim de salientar que, após as correções, mais de 95% das diferenças observadas entre as medidas de temperatura dos Sensores A e B ficaram dentro da incerteza de  $\pm 2$  °C, estabelecida pelos fabricantes.

A fim de validar as análises estabelecidas, as medidas de temperatura em diferentes condições de correção foram submetidas a testes estatísticos de análise de distribuição e análise múltipla de médias. Os dados utilizados para tal validação foram: valores de temperatura medidos pelos Sensores A e B, valores de temperatura corrigidos pela

equação de calibração dos Sensores A e B e valores de temperatura corrigidos pela equação de calibração e pelo efeito atmosférico para o Sensor A.

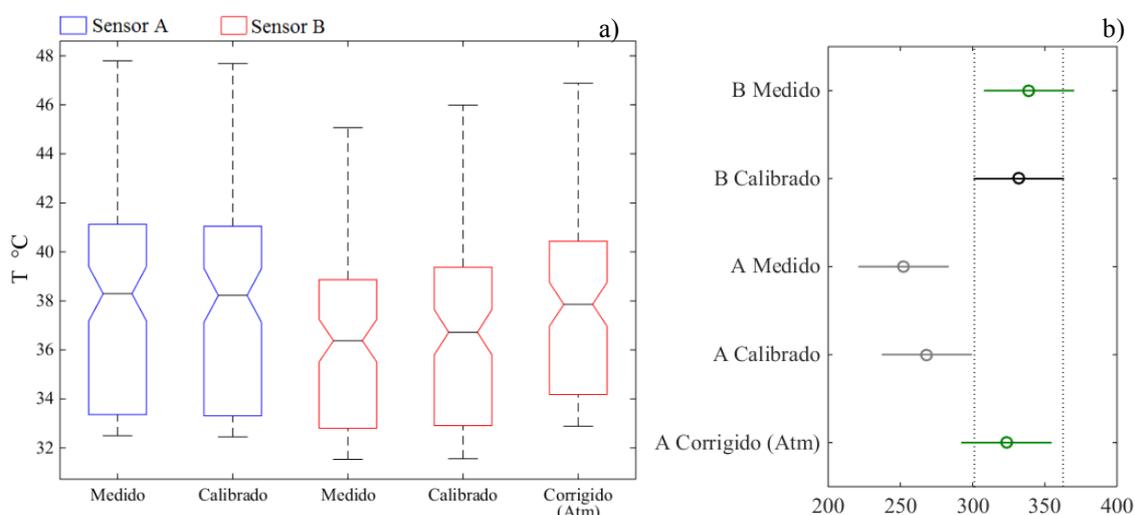
A análise estatística foi realizada através do teste de análise de variância não paramétrica de Kruskal-Wallis (KW). Este é utilizado para comparar três ou mais grupos de dados independentes e permite analisar se os diferentes grupos provêm de uma mesma distribuição. Assim, quando encontrada diferença significativa, procede-se com testes de comparações múltiplas. O intervalo de confiança adotado foi de 95%.

Na Figura 4.30-a, podem ser visualizados os *boxplots* de distribuição de cada um dos conjuntos amostrais resultantes da aplicação do teste. Este, quando aplicado à análise dos cinco grupos, apresentou *p*-valor igual a 0,027, inferior ao valor crítico adotado de 0,05, e assim, foi possível identificar que pelo menos um dos grupos era significativamente diferente dos demais. Dessa forma, adotou-se o teste de comparação múltipla. Através deste, foi possível verificar as discrepâncias das medidas do Sensor A em relação às medidas do sensor de referência.

Na análise múltipla, o conjunto de medidas realizadas pelo Sensor B, corrigidas pela equação de calibração, foi comparado com os demais. Em relação a este, observou-se que o conjunto de medidas realizadas pelo Sensor A com correção radiométrica e atmosférica não se distingue estatisticamente no nível de significância de 5%. As medidas obtidas pelo Sensor B sem qualquer correção também podem ser consideradas estatisticamente iguais às medidas do mesmo sensor corrigidas, no mesmo nível de significância.

Na Figura 4.30-b, está representado o resultado da análise múltipla de médias. Os grupos que não se diferem significativamente estão representados com traço na cor verde. Os demais grupos, representados em cor cinza, apresentam diferenças significantes das medidas pelo Sensor B com correção radiométrica, representado com traço de cor preta, no nível de 5%.

Figura 4.30 – Gráficos resultantes das análises estatísticas das medidas com diferentes níveis de correção.



Fonte: a própria autora.

O teste de Kruskal-Wallis também foi aplicado para comparar a distribuição do grupo de amostras de referência, Sensor B, com correção pela equação de calibração, em relação ao grupo amostral das medidas do Sensor A corrigidas pela equação de calibração e parâmetros atmosféricos. O  $p$ -valor obtido foi de 0,383 demonstrando que estatisticamente não há diferenças significantes entre tais grupos em um intervalo de confiança de 95%.

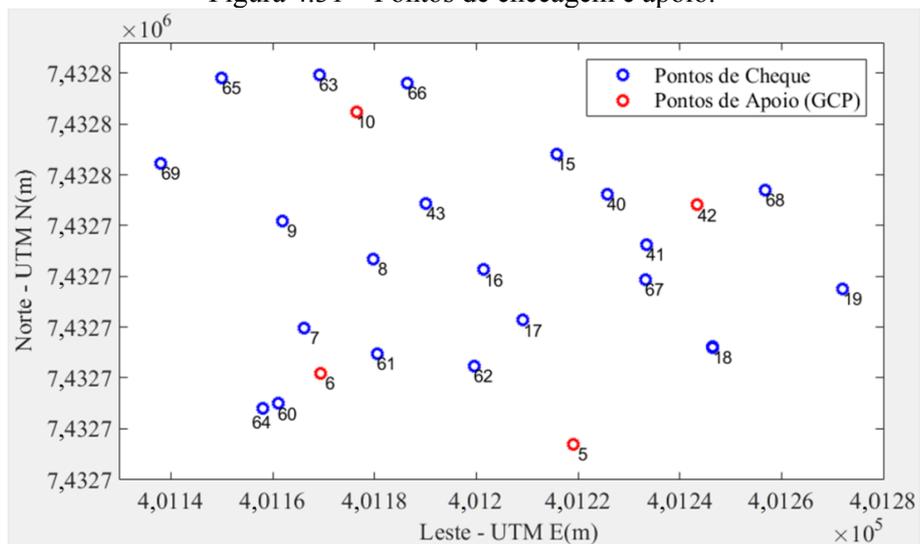
#### 4.5 Avaliação da exatidão posicional dos ortomosaicos e MDSs

Das 71 imagens coletadas, 64 foram utilizadas para a geração dos ortomosaicos, isso porque as imagens com distorção muito elevada foram descartadas. O processamento fotogramétrico foi realizado duas vezes, sendo que na primeira o ortomosaico foi gerado sem a utilização de pontos de controle (GCPs), utilizando assim apenas as coordenadas centrais de cada imagem. No segundo, foram utilizados quatro GCPs distribuídos na área de estudo.

Na Figura 4.31, pode ser observada a localização dos quatro pontos de apoio e 21 pontos de checagem, cujas coordenadas foram coletadas no ortomosaico de referência,

sendo os pontos em vermelho utilizados como pontos de apoio na geração do segundo ortomosaico, e os demais pontos, utilizados para a avaliação posicional. No ortomosaico sem GCPs, todos os pontos foram utilizados para a avaliação posicional.

Figura 4.31 – Pontos de checagem e apoio.

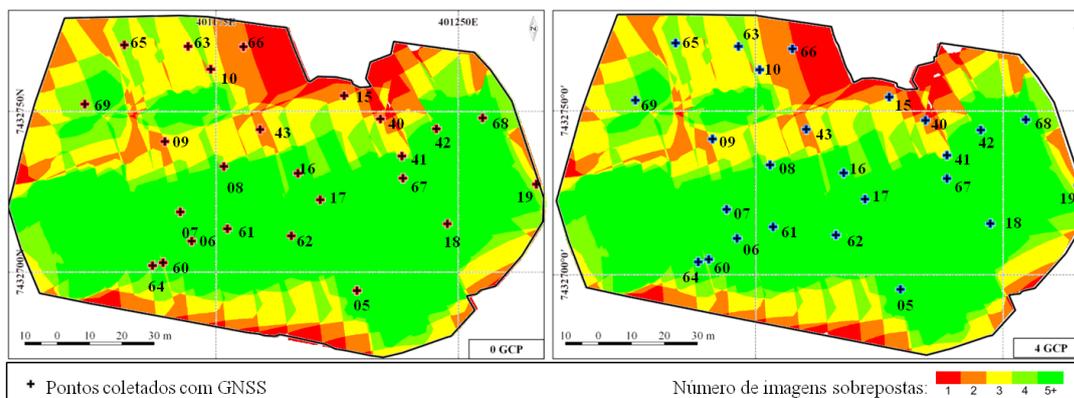


Fonte: a própria autora.

Após a geração dos dois ortomosaicos, foram coletadas as coordenadas dos pontos de verificação em cada um através de um *software* de geoprocessamento com *zoom* na proporção 1:1.

Na Figura 4.32, pode-se observar o número de imagens sobrepostas utilizadas nos processamentos.

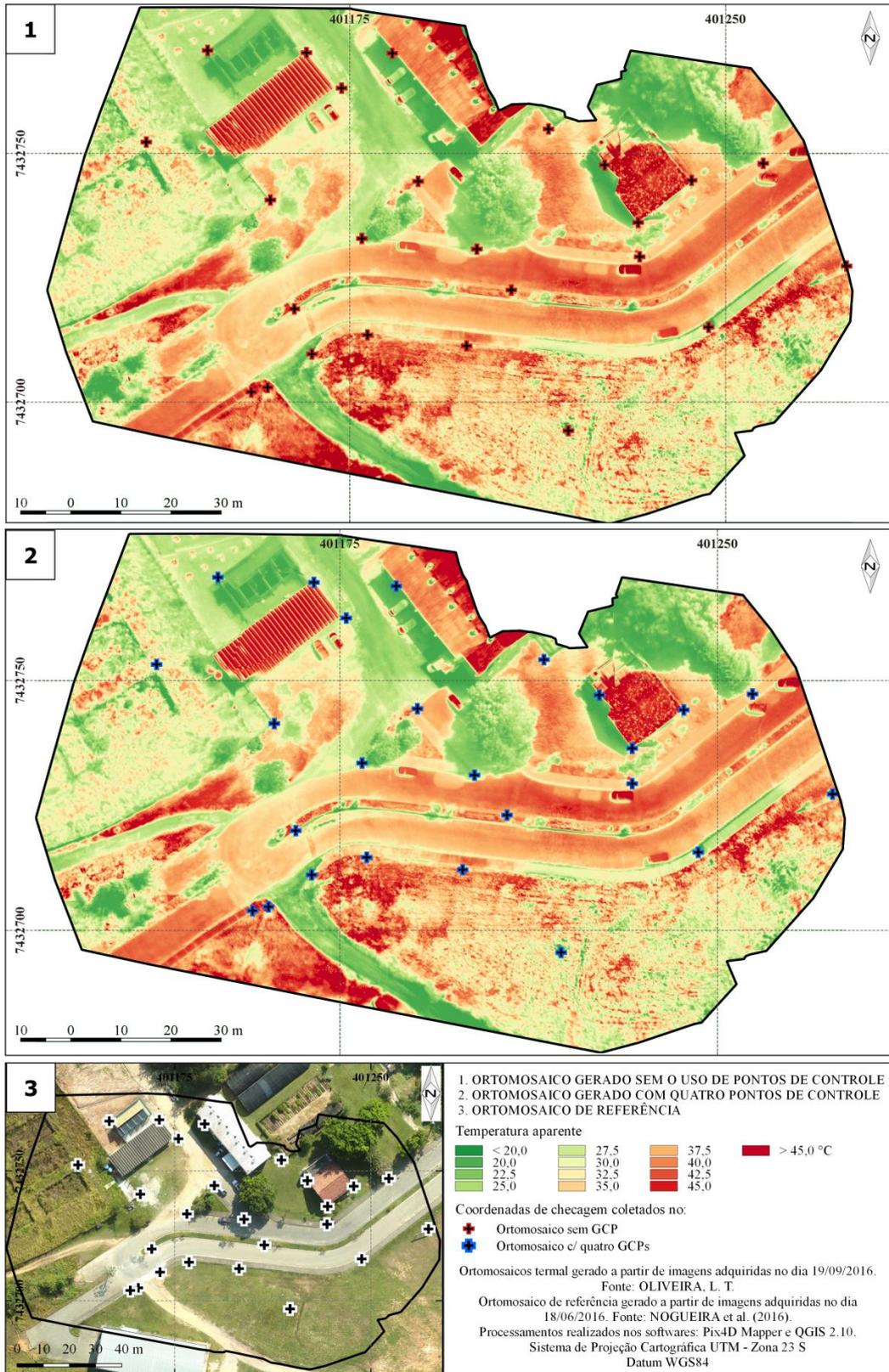
Figura 4.32 – Número de imagens sobrepostas utilizadas para a geração dos ortomosaicos.



Fonte: a própria autora.

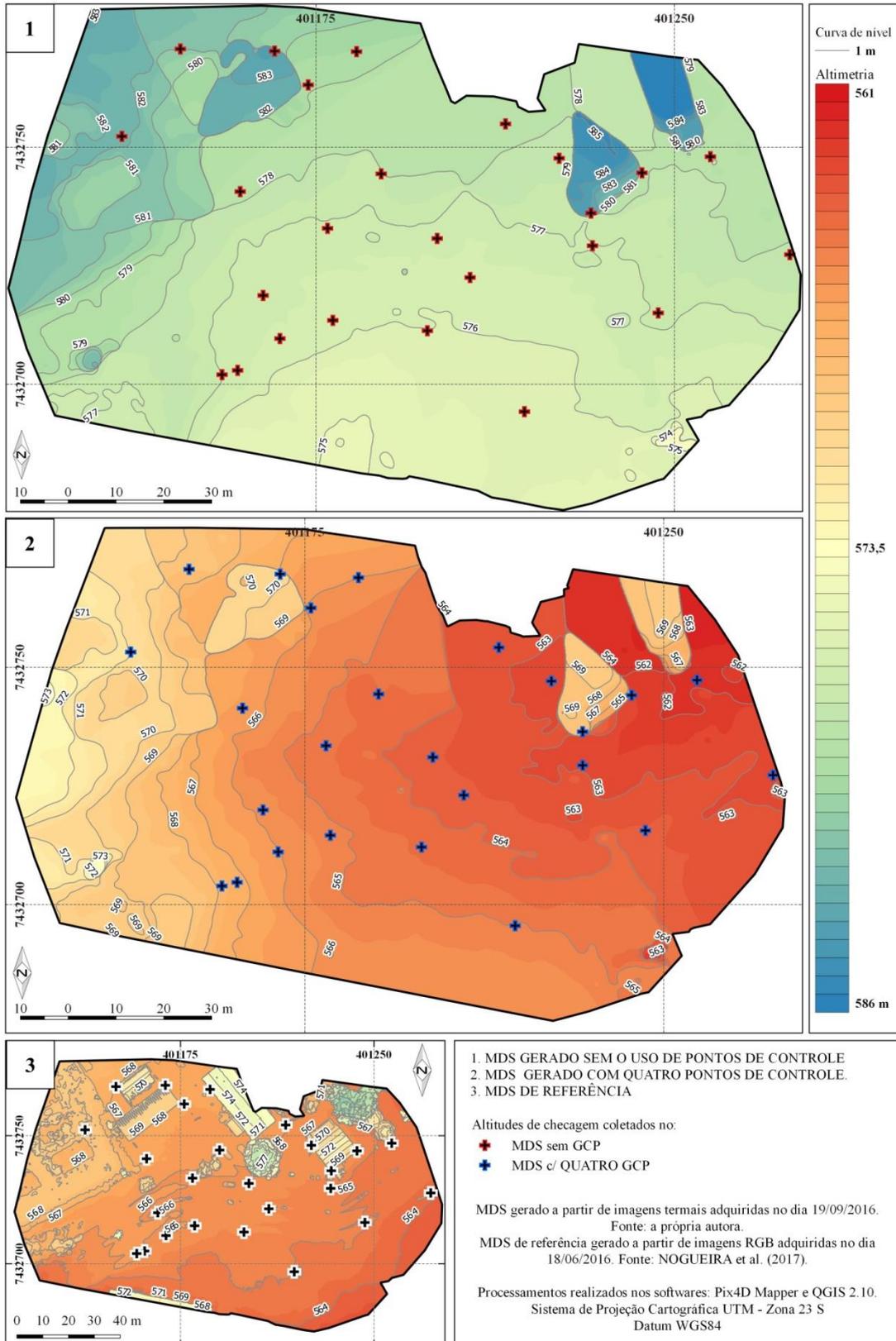
Os dois ortomosaicos termiais gerados, bem como a posição das coordenadas coletadas nestes e a ortofoto de referência estão representados na Figura 4.33. Os modelos de superfície gerados e de referência estão representados na Figura 4.34.

Figura 4.33 – Ortomosaicos termais gerados sem (1) e com pontos de controle (2).



Fonte: a própria autora.

Figura 4.34 – Modelos de superfície gerados sem (1) e com pontos de controle (2).



Fonte: a própria autora.

## 4.5.1 Análise Descritiva

### 4.5.1.1. Ortomosaico e MDS sem GCP

A primeira avaliação realizada foi do ortomosaico em que não se utilizou nenhum ponto de controle para o processamento. Assim, os 25 pontos cujas coordenadas foram coletadas no ortomosaico e MDS de referência foram utilizados para checagem dos erros posicionais. Na Tabela 4.2, são apresentadas as coordenadas coletadas para referência, as medidas no ortomosaico ( $E, N$ ) e no modelo de elevação ( $H$ ) avaliados, bem como os erros nos sentidos leste ( $\Delta E$ ) e norte ( $\Delta N$ ), na resultantes planimétrica ( $\Delta P$ ), e no sentido vertical ( $\Delta H$ ).

Tabela 4.2 – Estatísticas dos pontos de checagem do ortomosaico gerado sem GCPs (em metros).

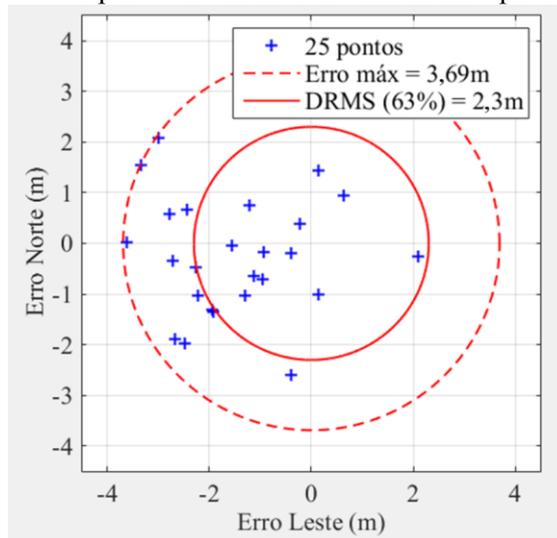
n°	ID	E (REF)	N (REF)	H (REF)	E (ORTOM.)	N (ORTOM.)	H (MDE)	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta P$	$\Delta H$	
1	5	401219,11	7432696,83	565,17	401218,71	7432694,24	575,76	0,40	2,59	2,63	10,59	
2	6	401169,40	7432710,99	566,00	401167,47	7432709,63	576,45	1,92	1,36	2,35	10,45	
3	7	401166,22	7432719,90	566,03	401164,00	7432718,87	576,73	2,22	1,02	2,45	10,70	
4	8	401179,67	7432733,41	565,92	401177,41	7432732,93	576,91	2,26	0,48	2,31	10,99	
5	9	401161,87	7432741,00	566,79	401159,16	7432740,65	578,16	2,71	0,34	2,73	11,37	
6	10	401176,44	7432762,38	566,70	401174,00	7432763,06	579,11	2,45	-0,68	2,54	12,40	
7	16	401201,52	7432731,35	565,74	401200,39	7432730,69	576,66	1,14	0,65	1,31	10,92	
8	17	401209,26	7432721,42	565,56	401208,30	7432720,71	576,33	0,95	0,72	1,19	10,77	
9	18	401246,49	7432716,09	565,07	401246,62	7432715,08	577,16	-0,13	1,01	1,02	12,09	
10	19	401272,01	7432727,62	564,12	401274,12	7432727,36	577,86	-2,10	0,26	2,12	13,74	
11	40	401225,73	7432746,24	569,39	401225,87	7432747,68	577,58	-0,14	-1,45	1,45	8,19	
12	41	401233,46	7432736,30	569,30	401232,53	7432736,13	583,74	0,93	0,17	0,95	14,44	
13	42	401243,43	7432744,07	569,34	401243,20	7432744,45	578,40	0,23	-0,38	0,45	9,06	
14	43	401190,17	7432744,37	566,26	401188,62	7432744,33	577,54	1,55	0,03	1,55	11,28	
15	15	401215,78	7432754,18	566,06	401214,57	7432754,92	578,30	1,21	-0,74	1,42	12,24	
16	60	401161,10	7432704,93	566,06	401158,61	7432702,96	576,74	2,48	1,97	3,17	10,68	
17	61	401180,48	7432714,81	565,90	401178,53	7432713,50	576,32	1,95	1,31	2,35	10,42	
18	62	401199,61	7432712,34	565,63	401198,31	7432711,31	575,96	1,30	1,03	1,66	10,33	
19	63	401169,14	7432769,70	570,05	401166,36	7432770,27	583,53	2,78	-0,57	2,84	13,49	
20	64	401158,04	7432703,93	566,20	401155,36	7432702,05	576,98	2,68	1,88	3,27	10,78	
21	65	401149,99	7432769,17	568,08	401146,64	7432770,72	581,02	3,35	-1,55	3,69	12,94	
22	66	401186,49	7432768,09	573,50	401183,50	7432770,16	579,37	2,99	-2,07	3,64	5,87	
23	67	401233,24	7432729,41	565,19	401232,84	7432729,23	576,97	0,40	0,18	0,44	11,78	
24	68	401256,88	7432747,06	564,79	401257,50	7432748,02	578,06	-0,62	-0,95	1,14	13,27	
25	69	401138,02	7432752,29	568,99	401134,40	7432752,30	582,16	3,61	-0,01	3,61	13,16	
								Média	1,46	0,26	2,09	11,28
								Desv. Padrão	1,38	1,15	0,98	1,85
								Mínimo	0,13	0,01	0,44	5,87
								Máximo	3,61	2,59	3,69	14,44

Fonte: a própria autora.

A média, o desvio padrão e os valores máximos e mínimos dos erros observados nas amostras também estão apresentados na Tabela 4.2. A média planimétrica observada foi de 2,09 m, sendo a componente leste a que mais contribuiu para o distanciamento

planimétrico dos pontos, apresentando 1,46 m de deslocamento neste sentido. No sentido norte, a média dos erros foi de 0,26 m. O erro planimétrico máximo observado foi de 3,69 m. Na Figura 4.35, verifica-se a dispersão dos erros planimétricos do ortomosaico sem GCPs. Dos 25 pontos observados, 13 ficaram dentro do DRMS planimétrico de 2,3 m.

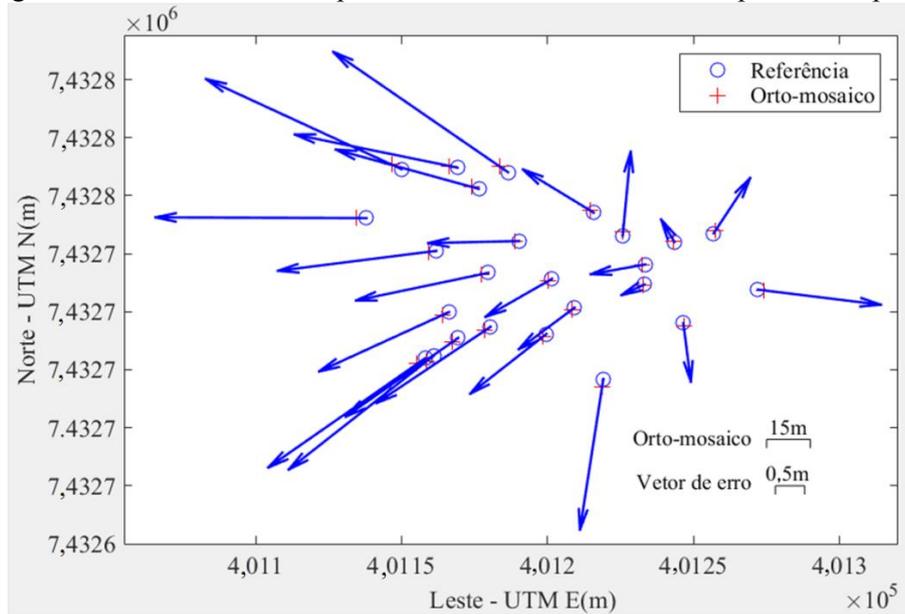
Figura 4.35 - Erro planimétrico do ortomosaico sem pontos de apoio.



Fonte: a própria autora.

Os vetores de erro planimétrico das amostras podem ser observados na Figura 4.36. Nesta representação, as escalas de distância utilizadas para os pontos do ortomosaico e para os vetores de erro são diferentes a fim de favorecer a visualização dos erros. Percebe-se que o ortomosaico teve um deslocamento maior no sentido oeste.

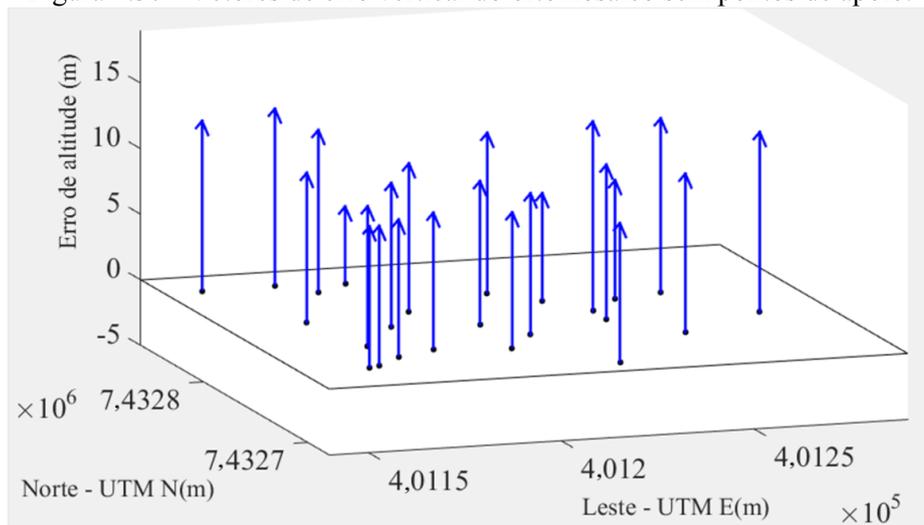
Figura 4.36 - Vetores de erro planimétrico do ortomosaico sem pontos de apoio.



Fonte: a própria autora.

Todos os deslocamentos do modelo de superfície foram positivos, indicando que, quando gerado apenas com as coordenadas centrais das imagens ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ), o modelo apresentou baixa exatidão, superestimando os valores de altitude, conforme se observa na Figura 4.37. A média dos erros altimétricos foi de 11,28 m.

Figura 4.37 - Vetores de erro vertical do ortomosaico sem pontos de apoio.



Fonte: a própria autora.

Os erros observados para os 25 pontos de checagem foram analisados utilizando a metodologia descrita na Seção 3.3.2, através das discrepâncias entre as coordenadas planialtimétricas de referência e aquelas obtidas nos ortomosaicos. Por meio desta metodologia foi possível classificar a qualidade cartográfica dos produtos resultantes.

#### 4.5.1.2. Ortomosaico e MDS com GCP

No segundo ortomosaico, foram utilizados quatro GCPs (Tabela 4.3) em seu processamento e 21 pontos de checagem para avaliá-lo. A distribuição dos pontos utilizados na área do mosaico pode ser visualizada na Figura 4.31, apresentada no início do capítulo.

Tabela 4.3 – Pontos de controle utilizados na geração do ortomosaico (em metros).

ID	E (GNSS)	N (GNSS)	H (GNSS)	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta H$
5	401219,050	7432696,755	565,203	0,004	0,004	0,011
6	401169,421	7432710,940	565,853	0,004	0,004	0,010
10	401176,454	7432762,490	566,547	0,004	0,003	0,008
42	401243,426	7432744,060	569,224	0,004	0,003	0,010

Fonte: a própria autora.

Na Tabela 4.4, são apresentadas as coordenadas coletadas no ortomosaico e MDS de referência, medidas no ortomosaico a ser avaliado ( $E$ ,  $N$ ) e medidas no modelo de elevação gerado ( $H$ ), bem como os erros nos sentidos leste ( $\Delta E$ ) e norte ( $\Delta N$ ), na resultante planimétrica ( $\Delta P$ ) e no sentido vertical ( $\Delta H$ ) oriundos do ortomosaico gerado utilizando quatro pontos de controle.

Tabela 4.4 – Estatísticas dos pontos de checagem do ortomosaico gerado com quatro GCPs (em metros).

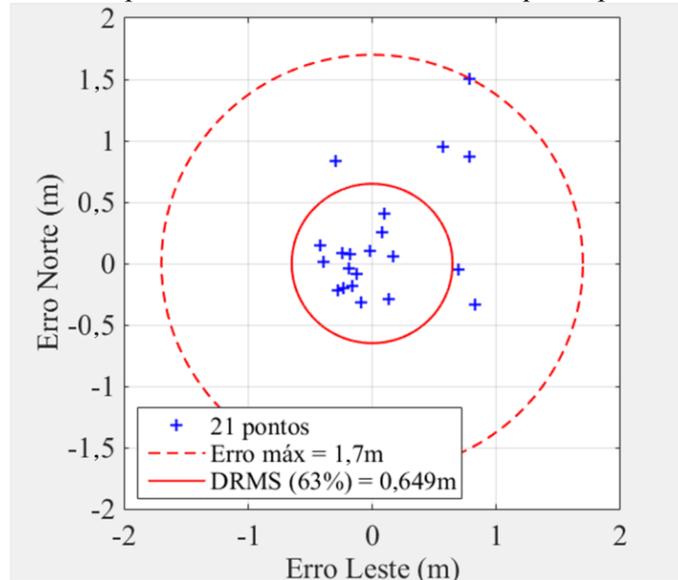
n°	ID	X (GNSS)	Y (GNSS)	Z (GNSS)	X (ORTOM.)	Y (ORTOM.)	Z (MDE)	ΔE	ΔN	ΔP	ΔH	
1	7	401166,22	7432719,90	566,03	401166,20	7432720,00	565,78	0,02	-0,11	0,11	-0,25	
2	8	401179,67	7432733,41	565,92	401179,49	7432733,49	564,72	0,18	-0,08	0,19	-1,20	
3	9	401161,87	7432741,00	566,79	401161,96	7432741,41	566,32	-0,10	-0,41	0,42	-0,47	
4	16	401201,52	7432731,35	565,74	401201,66	7432731,06	563,64	-0,14	0,29	0,32	-2,10	
5	17	401209,26	7432721,42	565,56	401209,13	7432721,34	563,73	0,12	0,09	0,15	-1,83	
6	18	401246,49	7432716,09	565,07	401246,40	7432715,77	563,74	0,09	0,32	0,33	-1,33	
7	19	401272,01	7432727,62	564,12	401272,84	7432727,29	562,76	-0,83	0,33	0,89	-1,36	
8	40	401225,73	7432746,24	569,39	401226,51	7432747,11	562,66	-0,78	-0,87	1,17	-6,73	
9	41	401233,46	7432736,30	569,30	401233,04	7432736,45	568,71	0,42	-0,15	0,44	-0,59	
10	43	401190,17	7432744,37	566,26	401190,34	7432744,42	564,31	-0,17	-0,06	0,18	-1,95	
11	15	401215,78	7432754,18	566,06	401215,54	7432754,26	563,24	0,24	-0,08	0,25	-2,82	
12	60	401161,10	7432704,93	566,06	401160,82	7432704,71	567,25	0,28	0,22	0,35	1,19	
13	61	401180,48	7432714,81	565,90	401180,32	7432714,63	565,23	0,16	0,19	0,25	-0,67	
14	62	401199,61	7432712,34	565,63	401199,38	7432712,14	564,43	0,23	0,21	0,31	-1,20	
15	63	401169,14	7432769,70	570,05	401169,84	7432769,65	570,18	-0,69	0,05	0,69	0,14	
16	64	401158,04	7432703,93	566,20	401157,64	7432703,95	567,73	0,40	-0,01	0,40	1,53	
17	65	401149,99	7432769,17	568,08	401150,78	7432770,67	568,54	-0,79	-1,51	1,70	0,46	
18	66	401186,49	7432768,09	573,50	401186,19	7432768,92	566,03	0,30	-0,83	0,88	-7,47	
19	67	401233,24	7432729,41	565,19	401233,05	7432729,37	562,82	0,19	0,04	0,19	-2,37	
20	68	401256,88	7432747,06	564,79	401256,95	7432747,32	561,77	-0,08	-0,25	0,26	-3,02	
21	69	401138,02	7432752,29	568,99	401138,59	7432753,23	570,91	-0,58	-0,95	1,11	1,92	
								Média	-0,07	-0,17	0,51	1,43
								Desv. Padrão	0,41	0,49	0,42	2,32
								Mínimo	0,02	0,01	0,11	0,14
								Máximo	0,83	1,51	1,70	7,47

Fonte: a própria autora.

A média, o desvio padrão e os valores máximos e mínimos observados nas amostras dos vetores de erros também são apresentados na mesma tabela (Tabela 4.4). A média dos erros planimétricos observada foi de 0,51 m, sendo a componente norte aquela que mais contribuiu para o distanciamento planimétrico dos pontos, apresentando -0,17 m de deslocamento neste sentido. A média dos erros do sentido leste foi de -0,07 m, inferior ao tamanho do GSD do ortomosaico, que foi de 0,09 m. O erro planimétrico máximo observado foi de 1,70 m.

Na Figura 4.38, verifica-se a dispersão dos erros planimétricos do ortomosaico com GCPs. Dos 21 pontos observados, 15 ficaram dentro no RMS planimétrico de 0,65 m. Este gráfico também permite observar que, neste ortomosaico, os erros apresentam-se mais agrupados e próximos ao centro, o que demonstra maior precisão e exatidão em relação ao ortomosaico gerado sem pontos de controle.

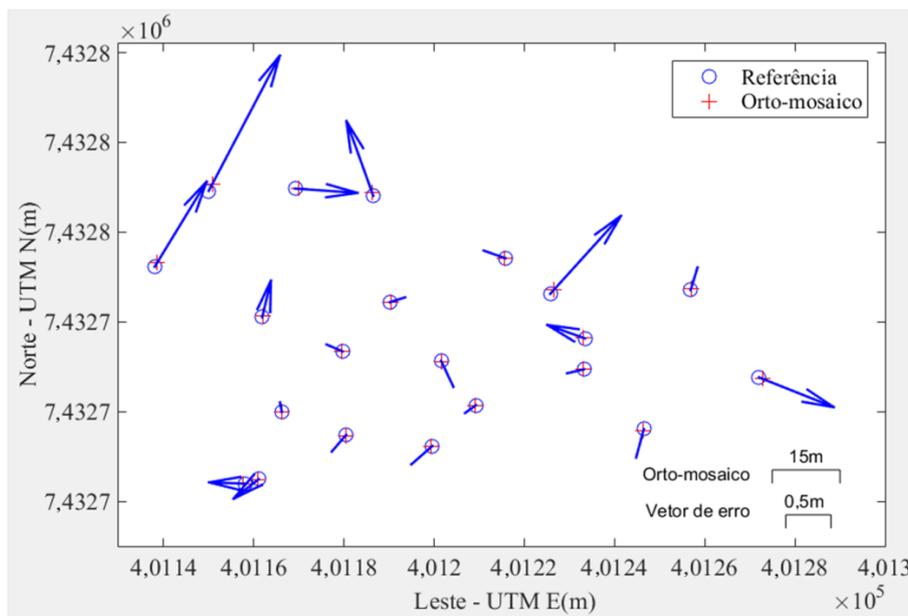
Figura 4.38 - Erro planimétrico – ortomosaico com quatro pontos de apoio.



Fonte: a própria autora.

Na Figura 4.39, estão apresentados os vetores de erros planimétricos. Observa-se que a maior parte dos erros planimétricos foi minimizada com a adoção de pontos de controle para o processamento. Essa melhora foi observada em menor intensidade nos pontos localizados nas extremidades do ortomosaico.

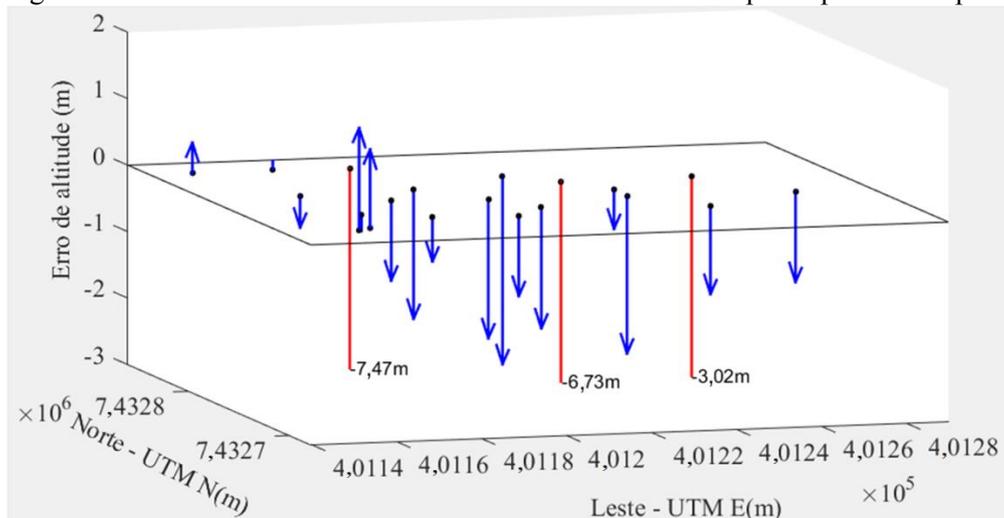
Figura 4.39 - Vetores de erro planimétrico do ortomosaico com quatro pontos de apoio.



Fonte: a própria autora.

Os deslocamentos do modelo de superfície estão representados na Figura 4.40. A maior parte dos erros (~76%) foi negativa, indicando que o modelo gerado com quatro pontos de controle subestimou os valores de altitude. Os maiores erros observados foram de -7,47 m, -6,73 m e -3,02 m. Na Figura 4.40 estes erros estão representados em vermelho e sem vinculação à escala do eixo z para melhor visualização dos demais erros. A média dos erros altimétricos foi de 1,43 m.

Figura 4.40 - Vetores de erro altimétrico do ortomosaico com quatro pontos de apoio.

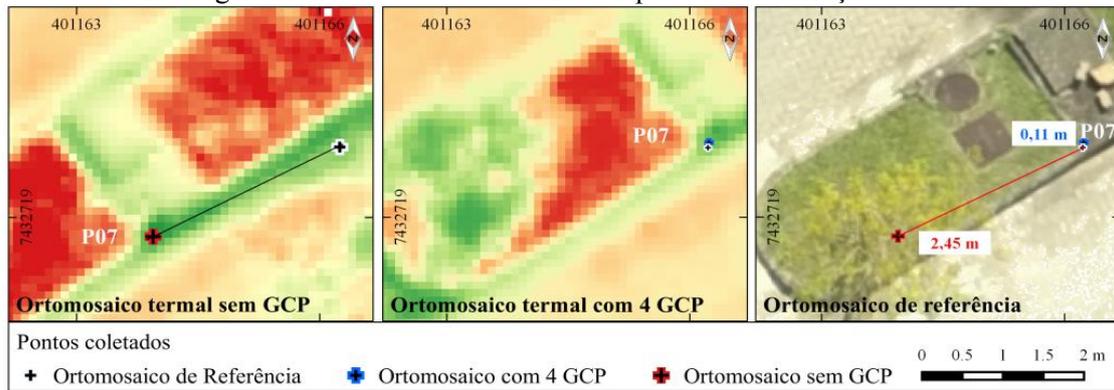


Fonte: a própria autora.

Dos 21 pontos observados, quatro foram escolhidos para uma melhor representação dos desvios planimétricos observados, sendo dois onde os desvios foram mais bem resolvidos com a adoção de pontos de controle, e dois onde o erro, apesar de minimizado, ainda foi significativo para a avaliação da precisão do ortomosaico.

O primeiro ponto analisado foi o P07 (Figura 4.41). Os erros observados nos ortomosaico sem e com GCPs, respectivamente, foram de 2,42 m e 0,11 m. Este ponto apresentou o menor erro no ortomosaico com GCPs. Tal melhora pode ser atribuída a sua proximidade posicional a um dos pontos de controle utilizados no processamento (P06), o que permite ressaltar a importância de um maior número de GCPs bem distribuídos na área para a geração de ortomosaicos.

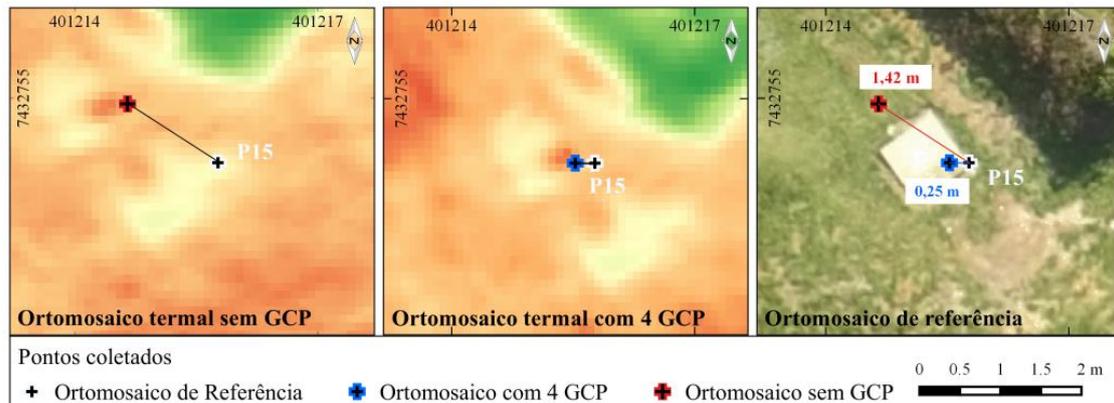
Figura 4.41 – Desvios observados no ponto de verificação P07.



Fonte: a própria autora.

O segundo ponto analisado foi o P15 (Figura 4.42). Este está localizado também próximo a um dos GCPs utilizados (P42) e apresentou uma melhora significativa no posicionamento, onde o erro planimétrico no ortomosaico sem GCPs foi de 1,42 m e no ortomosaico com quatro GCP caiu para 0,25 m.

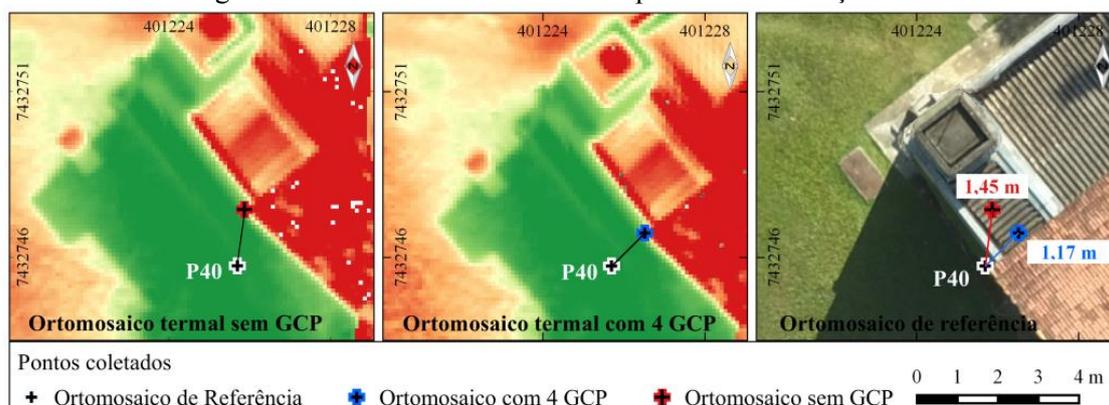
Figura 4.42 – Desvios observados no ponto de verificação P15.



Fonte: a própria autora.

No ponto P40 (Figura 4.43), o erro observado no ortomosaico sem GCPs foi de 1,45 m e no ortomosaico com GCP foi de 1,17 m. Apesar de sua proximidade do ponto de controle P42, a utilização de GCPs no processamento não conseguiu resolver bem o problema de posicionamento neste ponto.

Figura 4.43 – Desvios observados no ponto de verificação P40.

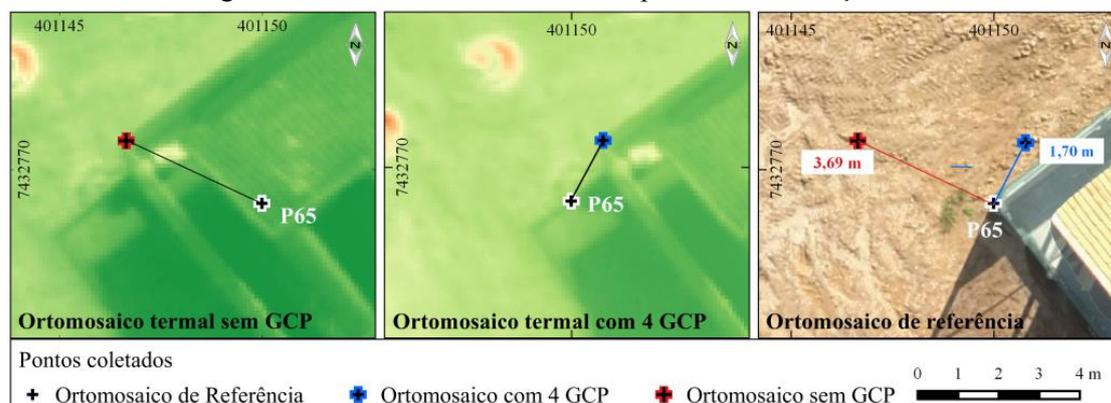


Fonte: a própria autora.

O ponto P40 refere-se a um dos vértices do telhado de um prédio, e foi neste setor da área mapeada que houve maior confusão para a geração do ortomosaico. O erro pode ser visualmente identificado nos dois ortomosaicos apresentados na Figura 4.43, onde se percebe uma falha na representação do telhado, que aparece com uma descontinuidade. Isso pode estar relacionado a quantidade de imagens sobrepostas na área. Observando-se a Figura 4.32, apresentada no início desta secção, constata-se que apenas duas imagens cobriram o ponto, o que pode ter dificultado a operação de moiscado, no sentido de que estas não possuíam parâmetros de orientação exterior suficientemente bons para a aerotriangulação e atribuição de coordenadas nesta área.

O último ponto analisado foi o P65 (Figura 4.44). Este ponto apresentou o erro planimétrico máximo, tanto no ortomosaico gerado sem GCPs, com desvio de 3,69 m, quanto no ortomosaico gerado com quatro GCPs, com desvio de 1,70 m. Assim como neste ponto, os pontos P69 e P66 apresentaram erros planimétricos elevados. A posição destes pontos na extremidade do ortomosaico pode ter contribuído para esta maior magnitude dos erros.

Figura 4.44 – Desvios observados no ponto de verificação P65.



Fonte: a própria autora.

A análise descritiva apresentada permitiu identificar a melhora na qualidade posicional do ortomosaico quando gerado utilizando quatro GCPs, demonstrando, entretanto, que um número maior de pontos de controle poderia minimizar erros que permaneceram elevados, mesmo considerando-se quatro GCPs. Observou-se também um maior deslocamento nos pontos posicionados na extremidade do ortomosaico e em áreas com menor sobreposição.

Para uma avaliação mais detalhada sobre a qualidade do ortomosaico e MDS gerados, será apresentada a seguir a análise estatística realizada sobre os produtos oriundos do levantamento de dados termais com VANT, bem como sua classificação em relação ao PEC-PCD.

## 4.5.2. Análise Estatística e classificação quanto ao PEC

### 4.5.2.1. Ortomosaico e MDS sem GCP

A primeira análise dos erros foi efetuada com o teste de Kolmogorov-Smirnov. Nela, os erros foram testados quanto à normalidade, uma vez que este é um pressuposto para a adoção dos testes de tendência e precisão visando à avaliação posicional.

Através deste teste, nos sentidos leste e vertical, obteve-se  $p$ -valor de  $2,9684 \times 10^{-07}$  e  $1,7983 \times 10^{-23}$ , respectivamente, rejeitando-se para os mesmos a hipótese nula de possuírem uma distribuição normal em um nível de significância de 5% (Tabela 4.5). Dessa forma, seguindo a metodologia adotada (Figura 3.22), a exatidão posicional no sentido leste e vertical foi analisada a partir da comparação dos percentis em relação ao PEC-PCD, assim como os erros planimétricos que possuem uma distribuição Rayleigh. As amostras de erro no sentido norte apresentaram distribuição normal, apresentando um  $p$ -valor de 0,3848 para o mesmo teste (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Resultado dos testes de normalidade para amostras de erros sem GCPs.

Teste de Normalidade - Kolmogorov Smirnov	
Intervalo de confiança	95%
Nível de significância	5%
Amostra	25
Graus de liberdade	24
Ks tabelado	0,2641
Ks calculado E	0,5443
Têm distribuição normal?	Não
$p$ -valor	$2,9684 \times 10^{-07}$
Ks calculado N	0,1748
Têm distribuição normal?	Sim
$p$ -valor	0,3848
Ks calculado H	1
Têm distribuição normal?	Não
$p$ -valor	$1,7983 \times 10^{-23}$

Fonte: a própria autora.

Com o pressuposto de distribuição normal das amostras, as amostras de erro no sentido norte foram testadas quanto à tendência, utilizando o teste *t-Student* em um nível de significância de 5%. A hipótese nula adotada foi de média igual a 0, e a hipótese alternativa, de média diferente de 0. Com  $p$ -valor 0,2624, aceitou-se  $H_0$ , concluindo-se que não há tendência no conjunto de amostras. Assim, seguindo-se a metodologia de avaliação (Figura 3.22), os erros no sentido norte tiveram a exatidão em relação ao PEC-PCD analisada a partir do teste de precisão.

O teste utilizado para avaliar a precisão posicional no sentido norte foi Qui-quadrado no nível de significância  $\alpha = 1\%$  e  $n = 25$ , este último correspondente aos pontos de verificação, ou seja, 24 graus de liberdade. Os testes de precisão foram realizados para

escalas e classes pré-definidas, conforme a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (CONCAR-EB, 2011), aplicados aos produtos digitais.

Inicialmente, foi encontrado o valor tabelado de  $\chi^2_{24,1} = 42,9798$  para um intervalo de confiança de 99%. Em seguida, foram calculados os valores de  $\chi^2$  para os erros no sentido norte (Tabela 4.6), com base no desvio padrão das amostras e no erro padrão estabelecido pelo PEC-PCD (Tabela 2.2).

Tabela 4.6 – valores de  $\chi^2$  calculados com para os erros no sentido norte.

$\chi^2$	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	3912,61	1096,61	274,15	43,86	10,97	1,75	0,44	0,11	0,02
B	1408,54	352,13	88,03	14,09	3,52	0,56	0,14	0,04	0,01
C	507,07	126,77	31,69	5,07	1,27	0,20	0,05	0,01	0,00
D	352,13	88,03	22,01	3,52	0,88	0,14	0,04	0,01	0,00

Fonte: a própria autora.

Assim, os valores de  $\chi^2$  calculados foram comparados estatisticamente com o valor tabelado, sendo possível verificar se o ortomosaico gerado sem GCPs, quando avaliado pelos erros no sentido norte, atende ou não ao PEC-PCD de acordo com cada classe e escala em um nível de significância de 1%. O resultado desta análise está apresentado na Tabela 4.7 e demonstrou que o ortomosaico avaliado recebeu classe D na escala 1:2.000, B na escala 1:5.000 e A na escala 1:10.000 e inferiores.

Tabela 4.7 - Avaliação do ortomosaico sem pontos de controle a partir dos erros norte.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
D	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: a própria autora.

Por não apresentarem distribuição normal, os erros no sentido leste, planimétrico e vertical tiveram a precisão posicional analisada através da análise por percentis. Assim, verificou-se que 90% dos erros observados são inferiores aos valores determinados pelo PEC-PCD para dada escala e classe. Os valores dos percentis de 90% obtidos foram: 3,61 m para os erros planimétricos, 2,99 m para os erros no sentido leste e 13,48 m para os erros no sentido vertical.

Os percentis calculados foram comparados com os valores do PEC-PCD estabelecidos para cada classe e escala nos sentidos norte e leste, planimétrico e altimétrico (Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10).

Tabela 4.8 – PEC planimétrico.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	0,183	0,365	0,730	1,824	3,648	9,142	18,262	36,524	91,331
B	0,322	0,644	1,288	3,219	6,438	16,094	32,189	64,378	160,945
C	0,536	1,073	2,146	5,365	10,730	26,824	53,648	107,296	268,241
D	0,644	1,288	2,575	6,438	12,876	32,189	64,378	128,756	321,889

Fonte: CONCAR-EB (2011).

Tabela 4.9 – PEC Altimétrico.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	0,27	0,27	0,27	0,54	1,35	2,70	5,40	13,50	27,00
B	0,50	0,50	0,50	1,00	2,50	5,00	10,00	25,00	50,00
C	0,60	0,60	0,60	1,20	3,00	6,00	12,00	30,00	60,00
D	0,75	0,75	0,75	1,50	3,75	7,50	15,00	37,50	75,00

Fonte: CONCAR-EB (2011).

Tabela 4.10 – PEC norte e leste.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	0,14	0,28	0,56	1,4	2,8	7,0	14	28	70
B	0,25	0,50	1,0	2,5	5,0	12,0	25	50	125
C	0,40	0,80	1,6	4,0	8,0	20,0	40	80	200
D	0,50	1,00	2,0	5,0	10,0	25,0	50	100	250

Fonte: CONCAR-EB (2011).

Comparando os valores de percentis calculados segundo padrão estabelecido pelo PEC-PCD com os percentis dos erros nos sentidos leste, planimétrico e vertical, obtiveram-se as seguintes avaliações (Tabela 4.11, 4.12 e 4.13):

Tabela 4.11 - Avaliação do ortomosaico sem pontos de controle a partir dos erros no sentido leste.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
D	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: a própria autora.

Tabela 4.12 - Avaliação do ortomosaico sem pontos de controle a partir dos erros planimétricos.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
D	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: a própria autora.

Tabela 4.13 - Avaliação do ortomosaico sem pontos de controle a partir dos erros verticais.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	Não Atende	Atende	Atende						
B	Não Atende	Atende	Atende						
C	Não Atende	Atende	Atende						
D	Não Atende	Atende	Atende	Atende					

Fonte: a própria autora.

Assim, analisando as Tabelas 4.7, 4.11, 4.12 e 4.13, observa-se que ortomosaico gerado sem GCP avaliado a partir dos erros norte e leste, obteve classe D a partir da escala 1:2.000, B a partir da escala 1:5.000 e A a partir de 1:10.000. Avaliado quanto aos erros planimétricos, este ortomosaico recebeu classe B para escala a partir de 1:5.000 e A a partir de 1:10.000. No sentido vertical,

o mosaico sem pontos de controle foi classificado como D a partir da escala 1:50.000 e A a partir da escala 1:100.000.

#### 4.5.2.2. Ortomosaico e MDS com GCP

Os erros observados para os 21 pontos de verificação do ortomosaico gerado utilizando quatro GCPs foram analisados quanto à metodologia usada, descrita na Seção 3.3.3.2 (Figura 3.22). O primeiro teste foi quando à normalidade das amostras, utilizando o teste Kolmogorov-Smirnov.

Os erros nos sentidos leste, norte e vertical apresentaram  $p$ -valor 0,0121, 0,0044 e  $1,5909^{-04}$ , respectivamente, e assim, no nível de significância de 5%, rejeitando-se assim a hipótese nula de que as amostras possuem distribuição normal e, portanto, estas

tiveram sua precisão analisada a partir da comparação dos percentis em relação ao PEC-PCD (Tabela 4.14).

Tabela 4.14 - Resultado dos Testes de Normalidade para amostras de erros com GCP.

Teste de Normalidade - Kolmogorov Smirnov	
Intervalo de confiança	95%
Nível de significância	5%
Amostra	21
Graus de liberdade	20
Ks tabelado	0,2813
Ks calculado E	0,3380
Têm distribuição normal?	Não
<i>p</i> -valor	0,0121
Ks calculado N	0,3699
Têm distribuição normal?	Não
<i>p</i> -valor	0.0044
Ks calculado H	0,4567
Têm distribuição normal?	Não
<i>p</i> -valor	1,5909E-04

Fonte: a própria autora.

As amostras ainda foram testadas quanto à tendência através do teste *t-Student* com a hipótese nula de média igual a 0 e a um nível de significância de 1%. Todas as amostras apresentaram um *p*-valor maior que 0,05, demonstrando que os erros estão livres de tendência.

Segundo a metodologia de avaliação, as amostras que não apresentem distribuição normal devem ser analisadas a partir da comparação por percentil. Assim, verificou-se que 90 % dos erros observados são inferiores aos valores determinado pelo PEC-PCD para dada escala e classe. Os valores dos percentis de 90 % obtidos foram: 1,1323 m para o erro planimétrico, 0,8996 m para o erro no sentido norte, 0,7850 m para o erro no sentido leste e 4,5008 m para o erro no sentido vertical.

Os percentis calculados foram comparados com os valores do PEC-PCD estabelecidos para cada classe e escala nos sentidos norte e leste, planimétrico e altimétrico (Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10). Os resultados destas avaliações estão apresentados nas Tabelas 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18.

Tabela 4.15 - Avaliação do ortomosaico com quatro pontos de controle a partir dos erros planimétricos.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
B	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
C	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
D	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: a própria autora.

Tabela 4.16 - Avaliação do ortomosaico com quatro pontos de controle a partir dos erros no sentido leste.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
B	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
C	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
D	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: a própria autora.

Tabela 4.17 - Avaliação do ortomosaico com quatro pontos de controle a partir dos erros no sentido norte.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
B	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
C	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
D	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: a própria autora.

Tabela 4.18 - Avaliação do ortomosaico com quatro pontos de controle a partir dos erros altimétricos.

	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
A	Não Atende	Atende	Atende	Atende					
B	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende				
C	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende				
D	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende				

Fonte: a própria autora.

Dessa forma, constatou-se que, analisado pelos erros planimétricos, no nível de significância de  $\alpha = 10\%$ , o ortomosaico com quatro GCPs obteve classe D a partir de 1:1.000, B a partir de 1:2.000, e A a partir da escala 1:5.000 (Tabela 4.15), as mesmas classes nas referidas escalas foram atribuídas ao ortomosaico quando avaliado pelos erros no sentido norte (Tabela 4.17). No sentido leste, o ortomosaico obteve classe C a partir da escala 1:1.000, B a partir da escala 1:2.000 e A a partir da escala 1:5.000 (Tabela 4.16). Na vertente altimétrica, este ortomosaico obteve classe B a partir de

25.000 e A a partir de 1:50.000 (Tabela 4.18). Nas demais escalas inferiores, o produto cartográfico foi rejeitado em relação ao PEC-PCD.

Para efeito de comparação a tabela 4.19 foi organizada com um resumo das classes obtidas pra cada escala nos dois ortomosaicos.

Tabela 4.19 – Classificação dos ortomosaicos de acordo com o PEC-PCD.

Escala	1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
<b>SEM GCPs</b>									
Leste	-	-	D	B	A	A	A	A	A
Norte	-	-	D	B	A	A	A	A	A
Planimétrico	-	-	-	B	A	A	A	A	A
Vertical	-	-	-	-	-	-	C	A	A
<b>COM QUATRO GCPs</b>									
Leste	-	C	B	A	A	A	A	A	A
Norte	-	D	B	A	A	A	A	A	A
Planimétrico	-	D	B	A	A	A	A	A	A
Vertical	-	-	-	-	-	B	A	A	A

Fonte: a própria autora.

Como resultado final das avaliações realizadas, conclui-se que o ortomosaico gerado sem pontos de controle demonstrou exatidão planimétrica a partir da escala 1:5.000 e altimétrica a partir de 1:50.000. Por outro lado, o ortomosaico processado com quatro pontos de controle apresentou exatidão altimétrica a partir de 1:25.000 e planimétrica a partir da escala 1:1.000. No entanto, como mencionado na Seção 3.1.4, o ortomosaico utilizado como referência possui exatidão planimétrica a partir da escala 1:1.000, e portanto, só pode ser utilizado como referência para a avaliação de produtos a partir da escala 1:3.000, já que a precisão dos pontos de verificação deve ser pelo menos 1/3 da precisão avaliada. Assim, considerar-se-á a exatidão do ortomosaico com quatro GCPs a partir da escala 1:5.000, em que recebeu classe A quanto ao PEC-PCD.

#### 4.6 Síntese dos Resultados e Discussão

A fim de se estabelecer uma relação precisa entre a temperatura termodinâmica de um objeto e a temperatura radiante medida por um sensor remoto, a caracterização e calibração do instrumento sensor utilizado é indispensável, sobretudo quando se deseja realizar uma análise quantitativa dos dados.

Neste trabalho, foram propostos e aplicados alguns procedimentos metodológicos para caracterização de dois sensores que operam na faixa do infravermelho termal. Para os sensores utilizados, não haviam informações disponíveis quanto aos parâmetros de calibração ou função de resposta espectral. O método descrito, nas condições de geometria e ambiente controlados aqui informados, se mostrou eficaz para dimensionar as capacidades radiométricas, espectrais e espaciais do sensor utilizado, apresentando resultados satisfatórios.

Na caracterização espectral, foi obtida a curva de função de resposta espectral de ambos os sensores e se constatou que a máxima sensibilidade deles situa-se em 12,1  $\mu\text{m}$ . Tal informação, de extrema relevância para estudos de sensoriamento remoto termal, não foi disponibilizada por nenhum dos fabricantes destes sensores. Segundo as especificações técnicas disponíveis, os dois sensores analisados operam na faixa espectral de 7,5 a 13  $\mu\text{m}$ . Contudo, a partir da caracterização espectral, observou-se que o Sensor B passa a detectar o fluxo incidente a partir de 8,1  $\mu\text{m}$ . Ambos os sensores, analisados apresentaram sensibilidade até o maior comprimento de onda medido, 14  $\mu\text{m}$ .

Outra característica dos sensores constatada em laboratório foi o EIFOV. Este foi calculado com base na caracterização espacial realizada. Concluiu-se que o Sensor A possui um campo de visada efetivo de  $0,367^\circ$  (6,4 mrad) e o Sensor B de  $0,175^\circ$  (3,05 mrad). Nas suas respectivas especificações técnicas, apenas o campo de visada instantâneo (IFOV) dos sensores foi informado pelos fabricantes, sendo 3,14 mrad para o Sensor A e 1,36 mrad para o Sensor B. A resolução espacial, no entanto, não depende apenas do IFOV, já que o espaçamento entre os sensores e a taxa de amostragem

também influem nas capacidades de resolução do sensor. Os valores de EIFOV encontrados demonstram a importância dos procedimentos de caracterização, a fim de reconhecer as reais capacidades e limitações de um sistema sensor em termos espaciais.

Ambos os sensores fornecem dados apenas em unidades de temperatura radiante, no entanto, quando se objetiva mensurar áreas com alvos que possuam diferentes valores de emissividade, é esta que exerce influência direta sobre os dados, e estes podem não apresentar acurácia. Para conversão a fabricante do Sensor A disponibilizou a função que permite obter o correspondente em número digital (ND) do dado medido em temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Do sensor B, nenhuma função de conversão foi informada.

Ao analisar a capacidade radiométrica em laboratório dos sensores caracterizados, constatou-se que, para valores de temperatura termodinâmica de  $65^{\circ}\text{C}$  e superiores, o Sensor A apresentou diferenças superiores que aquelas especificadas pelo fabricante. Vale ressaltar que nesta comparação foram utilizados os valores fornecidos pelos sensores (ou seja, com as correções internas). Isto pode indicar que as correções implementadas pelo fabricante não são as mais adequadas.

Sobre as diferenças observadas nas medições do CN realizadas pelos dois Sensores em laboratório, observou-se diferença de  $0,6^{\circ}\text{C}$  quando ajustada a temperatura termodinâmica do CN para  $40^{\circ}\text{C}$ . Essa diferença foi maior conforme o aumento da temperatura, sendo que para a temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$ , máximo valor ajustado, as medições realizada pelos Sensores apresentou discrepância de  $3,3^{\circ}\text{C}$ .

Quando a análise foi realizada usando valores de radiância, e assim desprezando a influência da emissividade do alvo, o Sensor A extrapolou as incertezas a partir da medida em que a temperatura termodinâmica ajustada no CN era de  $70^{\circ}\text{C}$ . As medidas realizadas pelo Sensor B ficaram dentro das incertezas especificadas nas duas análises.

Observou-se também que o Sensor A apresentou maior desvio em relação aos valores radiância esperados do que o Sensor B, sendo que em 87% das observações, o Sensor B obteve maior precisão nas medidas. A relação dos resíduos observados em relação à temperatura termodinâmica do CN foi oposta entre os sensores. Enquanto no Sensor A,

as medições foram subestimadas conforme o aumento da temperatura termodinâmica, no Sensor B, os valores fornecidos foram superestimados nesta mesma situação. Esse comportamento só foi observado na análise dos valores de radiância.

A partir da análise da capacidade radiométrica, resultaram as funções de correção para cada um dos sensores. Estas foram utilizadas para analisar dos dados coletados em campo, sendo eficientes para a correção dos dados, mesmo em situações não laboratoriais.

Através dos experimentos laboratoriais de caracterização radiométrica, foram deduzidas funções de conversão dos dados de temperatura radiante em °C para Radiância ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m$ ). Apesar de não apresentarem comportamento linear, os valores de radiância obtidos a partir destas apresentaram desvios dentro das incertezas estabelecidas pelos fabricantes. Assim, constatou-se que estes podem ser utilizados, desde que vinculados às respectivas incertezas.

Na análise radiométrica de campo superfícies com diferentes coberturas foram medidas pelos dois sensores analisados neste trabalho. O Sensor B foi adotado como referência e medições foram realizadas a 1,5 m de distância dos alvos. O Sensor A foi embarcado em um VANT e obteve medidas a 20 m de altura. Esta análise permitiu verificar as incertezas das medições em campo, considerando a influência da correção radiométrica dos dados e da atmosfera entre o alvo e o sensor embarcado.

Na análise da diferença entre as temperaturas medidas pelos Sensores A e B, observou-se que, com os dados brutos, sem qualquer correção posterior a coleta dos dados, a diferença média foi de 1,9 °C e o valor máximo observado foi de 4,2 °C. Apenas 50% das diferenças ficaram dentro da incerteza de  $\pm 2$  °C especificada pelo fabricante para ao menos 68% das amostras. Após serem corrigidas pelas equações de calibração, obtidas na etapa de caracterização radiométrica dos sensores, a diferença média observada foi de 1,45 °C e máxima de 3,7 °C, em que 69% das diferenças ficaram dentro das incertezas.

A análise também foi aplicada para os dados em radiância, e esta foi obtida por dois métodos, através da equação de Planck e por meio da equação de conversão deduzida da etapa de caracterização radiométrica. Os valores obtidos pelos dois métodos foram considerados estatisticamente iguais em um nível de significância de 5% com  $p$ -valor de 0,5546. E assim, adotou-se o método mais simples, a equação de conversão.

Os dados de radiância obtidos para os dois sensores obtiveram diferença média de  $1,23 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$  e valor máximo de  $3,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ . Cerca de 50% das diferenças ficaram dentro das incertezas estabelecidas.

Outra análise dos dados de radiância foi realizada, mas dessa vez com estes corrigidos pelos efeitos da atmosfera nos dados obtidos pelo Sensor A, a bordo do VANT. Nesta análise, a diferença média observada foi de  $-0,57 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$  e máxima de  $-2,01 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ . Nesta análise, 75% das diferenças ficaram dentro das incertezas.

Os dados de radiância de cada um dos sensores devidamente corrigidos, do Sensor A com correção radiométrica e atmosférica, e do Sensor B, apenas com correção radiométrica uma vez que a correção atmosférica não se fazia necessária, foram então convertidos novamente para temperatura e analisados quanto às diferenças observadas. A diferença média do conjunto de dados foi de  $0,32 \text{ }^\circ\text{C}$  e máxima de  $2,58 \text{ }^\circ\text{C}$ , sendo que 95% das diferenças ficaram dentro da incerteza de  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Estes dados foram submetidos ao teste estatístico de Kruskal Wallis que demonstrou que as temperaturas medidas pelo Sensor B, corrigidas pela equação de calibração, não podem ser consideradas significativamente diferentes das temperaturas medidas pelo Sensor A após todas as correções (calibração e atmosfera) em um intervalo de confiança de 95%. Vale ressaltar que, sem as correções, os dados medidos pelos diferentes sensores são significativamente diferentes.

Também em campo, utilizando o Sensor A embarcado, foram obtidas imagens termais em uma área de  $10.000 \text{ m}^2$ . A partir destas, foram gerados dois ortomosaicos: um utilizando apenas as coordenadas centrais de cada imagem, oriundas do GNSS embarcado, e o outro utilizando quatro pontos de controle coletados por GNSS em solo. Os ortomosaicos foram avaliados quanto a sua qualidade posicional a partir dos valores

de erro padrão apresentados pelo PEC-PCD. Os dados de referência para a avaliação foram coletados em um ortomosaico gerado com imagens na faixa do visível, obtido na mesma área de análise e avaliado com classe de exatidão A para a escala 1:1.000.

Na análise descritiva, identificou-se a melhora na qualidade posicional do ortomosaico gerado quando se utilizaram quatro GCPs. No entanto, ficou evidente que um número maior de pontos de controle poderia minimizar alguns erros que permaneceram elevados mesmo com a adoção dos quatro GCPs. Observou-se também um maior deslocamento nos pontos posicionados na extremidade do ortomosaico e em áreas onde a quantidade de imagens sobrepostas foi menor. Através da análise estatística concluiu-se que o ortomosaico gerado sem pontos de controle apresenta exatidão planimétrica a partir da escala 1:5.000 e altimétrica a partir de 1:50.000. Já o ortomosaico processado com quatro pontos de controle apresentou exatidão planimétrica a partir de 1:1.000 e altimétrica a partir de 1:25.000.

Os resultados da avaliação dos ortomosaicos com e sem o uso de pontos de controle no seu processamento demonstram que a sua utilização melhora consideravelmente a exatidão posicional do produto, permitindo que este possa ser utilizado em aplicações que exijam maior precisão.

O uso de sensores que operam no infravermelho termal tem sido crescente em áreas agrícolas, uma vez que estes sensores podem extrair dados não visíveis sobre a saúde de uma vegetação, e assim, permitir que medidas sejam tomadas para correção do problema. Contudo, para que tais medidas sejam aplicadas pontualmente nas plantas afetadas, por exemplo, é preciso conhecer a sua localização precisa. Assim, em ortomosaicos termais, a avaliação da exatidão posicional é altamente aconselhável uma vez que se não houver exatidão posicional para a escala adotada no imageamento, ainda que com boa qualidade radiométrica, o trabalho pode ser inútil para a resolução de um problema, como o exemplificado.

## 5 CONCLUSÕES

O conjunto de experimentos realizados, tanto laboratoriais quanto de campo, permitiu determinar um panorama de análises necessárias para avaliar produtos de sensoriamento remoto termal por VANT de forma que estes tenham qualidade e exatidão e deles possam ser extraídas informações úteis a diferentes aplicações.

As caracterizações em laboratório foram essenciais para determinar as capacidades e limitações destes sistemas sensores, bem como para derivar funções de correção, garantindo maior precisão dos dados.

A análise radiométrica com dados de campo permitiu verificar que, mesmo em baixas altitudes, a atmosfera pode exercer influência sobre os dados termais e levar a conclusões errôneas sobre os alvos, sobretudo em análises quantitativas.

Na avaliação da exatidão posicional dos produtos gerados através dos dados termais levantados por VANT, constatou-se que o uso de sensores que operam na faixa espectral do infravermelho termal é eficaz na obtenção de dados para a geração de ortomosaico, contudo, o uso de pontos de controle é indispensável para se obter uma boa qualidade do produto cartográfico resultante.

Observou-se que com, apenas quatro GCPs, houve uma melhora significativa no posicionamento, e que com um maior número de GCPs, bem distribuídos na área de estudo, a exatidão alcançada tenderia a ser maior. Sobre a distribuição dos GCPs, recomenda-se que haja pontos localizados nas extremidades da área, a fim de evitar deslocamentos maiores nestas regiões. Além disso, a sobreposição das imagens é um fator de peso para a qualidade do ortomosaico termal, uma vez que neste tipo de dados há maior dificuldade para a obtenção de pontos homólogos.

O uso da metodologia de avaliação posicional para a avaliação dos produtos gerados por dados termais se mostrou válida, desde que alvos compostos por materiais de baixa emissividade sejam utilizados para a identificação dos pontos de checagem na imagem termal. Vale ressaltar que o tamanho dos alvos utilizados, em experimentos como o

apresentado precisa ser considerado em relação ao tamanho do GSD planejado para a missão.

A classificação resultante da avaliação posicional realizada indicou que o ortomosaico gerado sem pontos de controle apresenta exatidão planimétrica para a classe B a partir da escala 1:5.000, e A a partir de 1:10.000; na vertente altimétrica, para a classe C a partir de 1:50.000, e A a partir de 1:100.000. Já o ortomosaico processado com 4 pontos de controle apresentou exatidão planimétrica para a classe A a partir de 1:5.000, e altimétrica para a classe B a partir de 1:25.000 e classe A a partir de 1:50.000.

Para a geração do MDS a partir de dados termais o *software* utilizado demonstrou menor eficiência. Os modelos de superfície resultantes tiveram exatidão posicional confirmada conforme o PEC-PCD apenas para médias escalas (1:25.000 com GCP e 1:50.000 sem GCPs). Levando em consideração o tamanho da área analisada, esperava-se um modelo com maior exatidão.

Considerando os resultados obtidos pela análise dos erros altimétricos, o uso do sensor termal para obtenção de dados que possam gerar o MDS demonstrou ser pouco eficiente, não atingindo exatidão para as grandes escalas (1:10.000 e superiores) em nenhum dos casos, o que pode ser explicado pela maior dificuldade na obtenção de pontos homólogos nas imagens termais.

No entanto, entende-se que na possibilidade da utilização de um sensor que opera em outra faixa espectral, como no visível ou microondas, por exemplo, já bastante utilizados para a geração de modelos de superfície, o uso de sensores termais para esta aplicação é dispensável.

Considerando-se as incertezas envolvidas no processo de obtenção de imagens termais, estas demonstraram ser uma alternativa eficaz para imageamento de áreas com características não aparentes na faixa do visível. Na área analisada, diferenças significativas de temperatura radiante puderam ser observadas em alvos que visivelmente pareciam iguais, como, por exemplo, na vegetação, telhados e em áreas sombreadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, L.W.; ANDERSON G.P. **Modtran report**. Phillips Laboratory, Geophysics Directorate. Ontar Corporation. 1996.
- ACTON RESEARCH CORPORATION. **Spectrapro-2500i**: operating instructions. Acton, MA, 2003.
- ALMEIDA, M. H. **Desenvolvimento de um software para avaliação de desempenho do sistema óptico em equipamento para retinografia digital**. 2007. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Carlos, São Carlos.
- ALVES JR., L. R.; CÔRTEZ, J. B. R., FERREIRA, M. E. Validação de mosaicos aerofotogramétricos utilizando fotografias obtidas com câmara digital não métrica acoplada a um VANT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA (CBC), 26., 2014, Gramado-RS. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, 2014. Disponível em: <[http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/603/CT04-101\\_1404786002.pdf](http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/603/CT04-101_1404786002.pdf)> Acesso em: 10 ago. 2015.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998. 259 p.
- ANDRADE, L. L. **Estimativa de temperatura e emissividade com imagens do sensor HSS (Hyperspectral Scanner System) e suas relações com materiais urbanos**. . São José dos Campos, SP: INPE, 2011. 128 f. (INPE-16962-TDI/1843). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3ARAGU2>>.
- APPLIED IMAGE. **USAF 1951**. Rochester, NY, 2005. Disponível em: <[https://www.appliedimage.com/files/8sYYLo/USAF\\_1951\\_Test\\_Target\\_T-20\\_v1-04.pdf](https://www.appliedimage.com/files/8sYYLo/USAF_1951_Test_Target_T-20_v1-04.pdf)>. Acesso em: 11 julho 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). **Positional accuracy standards for digital geospatial data**. 1. ed, 2014. v.1, . Disponível em: <<https://www.asprs.org/publications-other/manual-of-photogrammetry-errata.html>>. Acesso em ago. 2016.
- BARNHART, R. K.; HOTTMAN, S.; MARSHALL, D. M.; SHAPPEE, E. **Introduction to unmanned aircraft systems**. Boca Raton: Crc Press, 2011. 233 p. ISBN (978-1-4398-3521-0).
- BERNI, J.; ZARCO-TEJADA, P.J.; SUAREZ, L.; FERERES, E. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 47, n. 3, p. 722 – 738, 2009.
- BISPO, C. C. **A utilização do veículo aéreo não tripulado nas atividades de segurança pública em Minas Gerais**. 2013. 145 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Segurança Pública) – Academia de Polícia Militar de Minas Gerais e Fundação João Pinheiro. Belo Horizonte, 2013.
- BOGGIONE, G. A.; SILVA, M. V. A.; CARVALHO JUNIOR, N. R.; TELES, T. L.; NAZARENO, N. R. X. Definição da escala em imagens de sensoriamento remoto: uma

abordagem alternativa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009, p. 1739–1746. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.03.28>>.

BOREL, C. Error analysis for a temperature and emissivity retrieval algorithm for hyperspectral imaging data. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.17-18, p.5029-5045, 2008.

BRASIL. **Decreto n ° 89.817**, de 20 de junho de 1984. Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial da União. Brasília, 1984.  
BRASIL.

BRITO, J. L. N. E S. Proposta de metodologia para a classificação de documentos cartográficos. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 41, p. 27- 42, 1987.

BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ , 2007. 196 p.

CI SYSTEMS. **SR-800 extended area blackbody**. Simi Valley, 2004.

CONCAR-EB - COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA. **Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**- versão 2.1.3. Estrutura de Dados Geoespaciais Vetoriais (EDGV). Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Diretoria de Serviço Geográfico (DSG). Brasília, 2011.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: UNICAMP, 1999, 164 P.

DALMOLIN, Q.; LEAL, E. M. Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em CAD. **Boletim de ciências geodésicas**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 21-40, 2001.

DINGUIRARD, M.; SLATER, P.N., Calibration of space-multispectral imaging sensor: a review, **Remote Sensing of Environment**, v. 68, p. 194-205. 1999

DOD – SECRETARY OF DEFENSE. **Unmanned Aerial Vehicles (UAV) roadmap**. Washington, 2003. 195 p.

FERREIRA, A. M. R. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado – VANT, para uso em aerolevantamentos**. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas). Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

FLIR SYSTEMS. **THE FLIR A310 automation thermal camera**. 2016. Disponível em: <<http://www.flir.eu/automation/display/?id=41099>>. Acesso em 20 de maio de 2016.

FUCKNER, M.A. **Aplicação de imagens Aster no estudo do ambiente urbano de São Paulo e Rio de Janeiro**. São José dos Campos, 2007. 230p. (INPE-15203-TDI/1303). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Pesquisas Espaciais/INPE, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnK2Y/T97RK>>.

GALO, M.; CAMARGO, P.O. **O uso do GPS no controle de qualidade de cartas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 1., 1994, . Tomo II, Florianópolis – SC. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 1994. p. 41-48.

- HOFFMANN, H.; NIETO, H.; JENSEN, R.; GUZINSKI, R.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FRIBORG, T. Estimating evapotranspiration with thermal UAV data and two source energy balance models. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**. v.12, p. 7469-7502. 2015.
- JACOB, F., F. PETITCOLIN, T. SCHMUGGE, E. VERMOTE, A. FRENCH, AND K. OGAWA. Comparison of land surface emissivity and radiometric temperature derived from MODIS and ASTER sensors. **Remote Sensing of Environment**., v. 90, 137–152. 2004.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- JUDSON TECHNOLOGIES LLC. **Mercury cadmium telluride detectors**. Montgomeryville, 2002.
- KONTOES, C.; KERAMITSOGLU, I.; SIFAKIS, N.; KONSTANTINIDIS, P. SITHON: An airborne fire detection system compliant with operational tactical requirements. **Sensors (Basel)**, v. 9, n. 2, p. 1204–1220, 2009.
- KUENZER, C.; DECH, S. (eds.) **Thermal infrared remote sensing: sensors, methods, applications**. Springer Netherlands. 2013. 537 p. ISBN (978-94-007-9831-1).
- LAGÜELA, S.; DÍAZ-VILARIÑO, L.; ROCA, D. Theory of infrared thermography. In: RIVIEIRO, B.; SOLLA, M. (Orgs.) **Non-destructive techniques for the evaluation of structures and infrastructure**. Taylor e Francis Group, 2016. p. 113-138. (ISBN:978-1-315-68515-1).
- LEGA, M.; KOSMATKA, J.; FERRARA, C.; RUSSO, F.; NAPOLI, R. M. A.; PERSECHINO, G. Using advanced aerial platforms and infrared thermography to track environmental contamination. **Environmental Forensics**. v.13, n. 4, 2012.
- LEGA, M.; NAPOLI, R. M. A. **Aerial infrared thermography in the surface waters contamination monitoring**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 11., 2009, Chania, Greece. **Proceedings...** University of the Aegean, 2009.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. M. **Remote sensing and image interpretation**. 3. ed. New York: Wiley, 1994.
- LIMA, E. M.; THOMAZ, T. A. M.; SEVERO, T. C. **Mapeamento aerofotogramétrico digital utilizando fotografias de médio formato**. Monografia (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.
- LIMA FILHO, G. M. **Caracterização radiométrica de câmera que opera no infravermelho médio**. 2013. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos.

LIMA FILHO, G. M. **Metodologia de caracterização de sistema eletro-óptico para missões de busca e patrulha marítima**. 2015. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2015.

LONGHITANO, G. A. **VANTs para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/0347g6>>. Acesso em jan. 2016.

LORENZ, D. Temperature measurements of natural surfaces using infrared radiometers. **Applied Optics**. v.7, n.9, 1968.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: Imprensa Universitária – UFPR, 1987.

LUZ, C. C. **Avaliação da exatidão absoluta de ortofoto obtida por meio de dados brutos oriundos de veículos aéreos não tripulados (Sisvant)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésias) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MAGHRABI, A. H. **Ground based measurements of IR atmospheric radiation from Clear and Cloudy Skies**. PhD Thesis, University of Adelaide, Adelaide, Australia. 2007.

MARKOSKI, P. R. **Modelagem atmosférica (8 - 12  $\mu$ m) de ambientes úmidos aplicada no processo de correção dos dados de emissividade do sensor ASTER**. 2015. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2015.

MATIKAINEN, L.; LEHTOMÄKIA, M.; AHOKASA, E.; HYYPPÄÄ, J.; KARJALAINENA, M.; JAAKKOLAA, A.; KUKKOA, A.; HEINONEN, T. Remote sensing methods for power line corridor surveys. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 119, p.10–31, 2016.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (orgs.) **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPq, 2012. 266 p.

MERCHANT, D.C. **Spatial accuracy standards for large scale line maps**. Denver-CO, USA, 1982. p. 222-231. Technical Papers of American Congress on Surveying and Mapping.

MOREIRA, R. C. **Espectroscopia por imageamento**. 2. ed. São José dos Campos: IEAv, 2012. Apostila.

NOGUEIRA, F. C.; ROBERTO, L.; KÖRTING, T. S.; SIGUEMORI, E. H. **Accuracy analysis of orthomosaic and DSM produced from sensor aboard UAV**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 18., 2017, Santos. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2017.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 387 p.

ONTAR. **PcModWin** - Overview [on line]. Ontar Corporation. Disponível em: <http://www.ontar.com/Software/ProductDetails.aspx?item=PcModWin> Acesso em: set, 2011.

OPTRIS, GMBH. **Infrared cameras**: the most portable infrared online cameras in the world. Disponível em: < [http://www.optris.com/pi-lightweight-netbox?file=tl\\_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/PI\\_Brochure.pdf](http://www.optris.com/pi-lightweight-netbox?file=tl_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/PI_Brochure.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2016

PALERMO, R. A.; LEITE, T. C. **Integração de levantamento fotogramétrico aéreo com uso de VANT e levantamento fotogramétrico terrestre para o mapeamento tridimensional das ruínas de São Miguel das Missões**. Projeto Cartográfico. Curso de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

PEREIRA, T. A. J.; NERO, M. A. Análise de normas de controle de qualidade posicional em cartografia ao redor do mundo: exemplos atuais de alguns países. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 4., 2012, Recife. **Anais...** Recife – PE: UFPE, 2012. p. 001 – 009.

PERES, L. F.; DACAMARA, C. C. Land surface temperature and emissivity estimation based on the two-temperature method: sensitivity analysis using simulated MSG/SEVIRI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 3- 4, p. 377-389, 2004.

PIX4D. **pix4dmapper software manual support**. Lausanne, Switzerland: Pix4D SA, 2013. Available in: <<https://support.pix4d.com/forums/22655307-Manual>>. Access: jul.2016.

PONZONI, F. J.; ZULLO JR., J.; LAMPARELLI, R. A. C. **Calibração absoluta de sensores orbitais: conceituação, principais procedimentos e aplicação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. v. 1, 64 p.

REES, W. G. **Physical principles of remote sensing**. 3.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 441 p.

ROBERTO, A. J. **Extração de informação geográfica a partir de fotografias aéreas obtidas com VANTs para apoio a um SIG municipal**. 93f. Dissertação (Mestrado em Sistema de Informações Geográficas) – Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Universidade do Porto, Porto, 2013.

ROCHA, R. S. **Exatidão cartográfica para as cartas digitais urbanas**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

ROGALSKI, A. **Infrared detectors**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. (ISBN: 978-1-4200-7671-4).

SALAMÍ, E.; BARRADO, C.; PASTOR, E. UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas. **Remote Sensing**. v. 6, n. 11, p. 11051-11081, 2014. doi:10.3390/rs61111051.

SANTOS, D. R. **Elementos de fotogrametria e sensoriamento remoto**. Curso de Engenharia Cartográfica. Departamento de Geomática. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

SBFÍSICA. **O espectro eletromagnético**. 2015. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/v1/novopion/index.php/publicacoes/imagens/130-espectro-eletromagnetico>>. Acesso em nov. 2016.

SCHOTT, J. **Remote sensing: the image chain approach**. New York: Oxford University Press, 2007.

SETTERFIELD, B.; SETTERFIELD. H. **Blackbody radiation**. 2009. Disponível em: <[http://www.setterfield.org/Data\\_and\\_Creation/ZPE-Plasma\\_model.html](http://www.setterfield.org/Data_and_Creation/ZPE-Plasma_model.html)>. Acesso em abril de 2017.

SHENG, H.; CHAO, H.; COOPMANS, C.; HAN, J.; MCKEE, M.; CHEN, Y. **Low-cost UAV-based thermal infrared remote sensing: platform, calibration and applications**. In: IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONIC AND EMBEDDED SYSTEMS AND APPLICATIONS, 2010, QingDao, China. **Proceedings...** IEEE, 2010. p-38-43.

SILVA, D. C.; MELO, I. D. F.; OLIVEIRA, R. N. Q. **Alta resolução com uso de câmaras digitais de baixo custo para mapeamento**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2005.

SLATER, P. N. **Remote sensing, optics and optical system**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1980. p. 246- 247.

SMIGAJ, M; GAULTON, R.; BARR, S. L.; SUÁREZ, J. C. Uav-Borne thermal imaging for forest health monitoring: detection of disease-induced canopy temperature increase. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-3/W3, p.349-354, 2015.

SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 4, p. 434–440, 2004.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

TOMMASELLI, A. M. G.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. Análise da exatidão cartográfica da carta imagem de "São Paulo". In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., 1988, Natal - RN, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 1988. v.1, p. 253-257.

VASTERLING, M.; MEYER, U. Challenges and Opportunities for UAV-Borne Thermal Imaging. In: KUENZER, C.; DECH, S. (eds). **Thermal infrared remote sensing: sensors, methods, applications**. Springer Netherlands. 2013. p.69-92. ISBN (978-94-007-9831-1).

VIÚDEZ-MORA, A. **Atmospheric downwelling longwave radiation at the surface during cloudless and overcast conditions. Measurements and modeling**. Tese de Doutorado \_ Universidade de Girona, Espanha, 2011.

WARREN, M. S. Desagregação espacial de estimativas de evapotranspiração real obtidas a partir do sensor modis. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 153–162, jun. 2013.

WATTS, A.C., AMBROSIA, V.G., HINKLEY, E.A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1671 – 1692, 2012.

WOLF, P.R. **Elements of photogrammetry**. Singapore: Mc Graw-Hill, 1985. 562p. (ISBN 93-329-0167-8).